



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

NÁVRH A OPTIMALIZACE FLUIDNÍHO ROŠTU Z HLEDISKA FUNKČNOSTI A EKONOMIKY VÝROBY

FLUID GRATE DESIGN AND OPTIMALIZATION IN THE FUNCTION ASPECT POINT OF
VIEWAND ECONOMY OF PRODUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PETR VORÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RICHARD NEKVASIL, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Petr Voráč

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh a optimalizace fluidního roštu z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby

v anglickém jazyce:

Fluid grate design and optimization in the function aspect point of view and economy of production

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na návrh a optimalizaci fluidního roštu. Diplomová práce by měla obsahovat návrhy několika fluidních roštů. U těchto roštů vhodným softwarem určit proděnění tímto roštem a tlakovou ztrátu. Tlaková ztráta fluidního roštu by se měla pohybovat v určitém intervalu. Pokud je tato podmínka splněna a prokázána výpočtem, je zapotřebí určit ekonomickou analýzu výroby takového roštu. Následně se provede celkové srovnání navržených roštů a navrhne se ten nejvýhodnější.

Cíle diplomové práce:

1. Rozbor řešeného problému
2. Namodelování zadaného roštu + vlastních návrhů roštů
3. Určení tlakové ztráty jednotlivých roštů
4. Porovnání tlakové ztráty jednotlivých roštů s intervalovými hodnotami
5. Ekonomická analýza výroby jednotlivých roštů (možnost konzultace s příslušnou výrobní firmou o ceně takového produktu)
6. Porovnání roštů z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby
7. Doporučení nejvýhodnějšího roštu a zpracování výrobního výkresu

Seznam odborné literatury:

[1]Medek J.: Hydraulické pochody, CERM, Brno 2004.

[2]Pavelek M. a kolektiv: Termomechanika, CERM, Brno 2003.

[3]Stehlík P., Kohoutek J., Němčanský J.: Tepelné pochody: Výpočet výměníku tepla, VUT Brno, Brno 1991.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá fluidní vrstvou, jejími druhy a problémy při její tvorbě. Cílem práce bylo vybrat rošt, který je nejvhodnější jak z ekonomického, tak z technologického hlediska. Celkem jsou v práci srovnávány tři různé fluidní rošty. První rošt byl součástí zadání diplomové práce. Další dva typy pak byly navrženy autorem diplomové práce. Návrhy roštů jsou zde rozpracovány podrobně, to je od fáze návrhu, přes modelování a následnou simulaci v počítačovém programu. Výsledkem simulace je tlaková ztráta, která je porovnána s doporučenými intervalovými hodnotami. V další části práce jsou rošty podrobeny technicko-ekonomické analýze. Výsledkem je rošt, který vyhovuje daným kritériím a při jehož výrobě dochází k výrazné úspoře finančních prostředků.

Klíčová slova

Fluidizace, optimalizace fluidního roštu, modelování tekutin, metoda CFD, fluidní vrstva, fluidní rošt, tlaková ztráta roštu, ekonomická analýza roštu.

Abstract

The Master's thesis deals with the fluid layer, with types of fluidized layer and with problems which can be solve during design of new fluidized beds. The aim was find the fluidized grid, which is the best form economical and technological point of view. In this work are compared three fluidized grids. The first was part of submission. Next two additional types were then proposed by the author of thesis. Proposals grids are discussed in detail from the design phase, through the modeling and subsequent simulation part in a computer program. The results of simulation are pressure losses. Which are compared with the recommended interval values. Afterward these tested beds are put through technical and economic analysis. The result is grade which is met both requirements.

Keywords

Fluidization, fluidized bed optimization, fluid flow modeling, CFD method, fluidized bed, fluidized layer, pressure loss of fluidized bed, economical analysis of fluidized bed.

Bibliografická citace

VORÁČ, P. *Návrh a optimalizace fluidního roštu z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Richard Nekvasil, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Návrh a optimalizace fluidního roštu z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v příložené bibliografii.

V Blansku dne 10.5.2010

.....

Petr Voráč

Poděkování

V této části bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za neustálou podporu, jak morální, tak psychickou, během celého studia.

Dále bych chtěl poděkovat škole, především Ing. Richardovi Nekvasilovi Ph.D. za cenné připomínky, rady a informace v průběhu vypracování diplomové práce.

Za cenné odborné informace, bez kterých by tato práce těžko vznikla, bych chtěl poděkovat. Jmenovitě:

- panu Ing. Přemyslu Kólovi ze společnosti Tenza a.s.
- panu Ing. Jiřímu Šebelovi z firmy Atona s.r.o.
- panu Miroslavu Nečasovi z firmy Zámečnictví Miroslav Nečas

Obsah

1. Úvod	10
2. Rozbor řešeného problému	11
2.1. Fluidizace	11
2.2. Fluidní vrstva	11
2.3. Základní druhy fluidních vrstev	12
2.4. Procesy ve fluidní vrstvě	13
2.5. Konstrukční provedení fluidních komor	14
2.6. Aerodynamika fluidní vrstvy, fluidní rošt	16
2.7. Tlakový diagram fluidní vrstvy	18
2.8. Výpočet prahové rychlosti	19
2.9. Přenos tepla a hmoty	21
3. Návrhy roštů	25
4. Proudové křivky jednotlivých roštů	27
4.1. Parametry vstupních médií	27
4.2. Výpočet vstupních rychlostí do jednotlivých roštů	27
4.3. Výpočet rychlostí pro první rošt	28
4.4. Výpočet rychlostí pro druhý rošt	29
4.5. Výpočet rychlostí pro třetí rošt	30
4.6. Stanovení výstupní rychlosti z roštu	31
4.7. Simulace proudění	32
4.8. První rošt	32
4.9. Druhý rošt	35
4.10. Třetí rošt	37
5. Proudové křivky pro médium 2 (vodní pára)	40
5.1. První rošt pro vodní páru	40
5.2. Druhý rošt pro vodní páru	42

5.3. Třetí rošt pro vodní páru.....	45
6. Porovnání tlakové ztráty jednotlivých roštů s intervalovými hodnotami	47
6.1. Tlaková ztráta na prvním roštu (médium 1).....	47
6.2. Tlaková ztráta na druhém roštu (médium 1).....	49
6.3. Tlaková ztráta na třetím roštu (médium 1).....	51
6.4. Tlaková ztráta na prvním roštu (médium 2).....	53
6.5. Tlaková ztráta na druhém roštu (médium 2).....	54
6.6. Tlaková ztráta na třetím roštu (médium 2).....	56
6.7. Výpočet tlakového poměru na prvním roštu	58
6.8. Výpočet tlakového poměru na druhém roštu	58
6.9. Výpočet tlakového poměru na třetím roštu.....	58
6.10. Výsledné tlakové poměry	59
7. Ekonomická analýza jednotlivých roštů	60
7.1. Materiálové náklady	60
7.2. Náklady na svařování.....	63
7.3. Náklady na přepravu	68
7.4. Celkové náklady na výrobu roštů	68
8. Porovnání roštů z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby.....	69
9. Doporučení nejvhodnějšího roštu a zpracování výrobního výkresu.....	70
10. Závěr	71
11. Seznam obrázků.....	73
12. Seznam tabulek.....	74

1. Úvod

Diplomová práce shromažďuje informace o fluidních vrstvách, fluidních roštích a jejich následné simulace pomocí metody CFD (z anglického Computational fluid dynamics - simulace proudění a dynamiky tekutin).

V teoretické části diplomové práce se čtenář seznámí s fluidní vrstvou a jejím využitím. V práci jsou probrány jednotlivé typy fluidních vrstev, jejich výhody a nevýhody.

Fluidní zařízení se skládá z fluidní komory a fluidního roštu, kde vstupuje médium do komory. Úkolem fluidního roštu je rozmístění vzduchu nebo jiného média rovnoměrně po celém průřezu komory. Proto je rošt osazen přepážkami, které brání cestě vzduchu, dochází tak k rovnoměrnému rozložení média po celém průřezu komory. Zároveň však dochází k intenzivnímu mísení jednotlivých proudů, což způsobuje intenzivní přenos tepla. Konstrukčnímu provedení přepážek a uspořádání roštů ve fluidní komoře je věnována druhá část teoretické části.

Výpočtová část je věnována jednotlivým roštům. Rošty jsou zde zpracovány od návrhu až do finální podoby, kde dochází k jejich ekonomickému zhodnocení. V průběhu diplomové práce byly zpracovávány tři rošty, první pochází od zadavatele diplomové práce, společnosti Tenza a.s., další rošty pak byly navrženy v průběhu diplomové práce. Výsledkem diplomové práce je výběr nejlepšího řešení. Jak z ekonomického, tak technologického hlediska.

Simulační část je věnována proudovým křivkám (proudnicím), díky kterým můžeme pozorovat intenzitu mísení. Druhým neméně důležitým parametrem je tlaková ztráta, která by se měla pohybovat v oblasti doporučených hodnot. Této problematice je věnována druhá část výpočtové části.

Závěrečná část je věnována hodnocení roštů z několika hledisek, z hlediska funkčního, hlediska ekonomického a v poslední řadě z hlediska ekonomicko-technologického.

2. Rozbor řešeného problému

2.1. Fluidizace

Proces nazvaný fluidizace zahrnuje sušení, chlazení, spalování, granulaci, nástřik nátěrových hmot a řadu dalších oblastí. Fluidizace je ideální pro širokou škálu použití. Tato metoda se používá i pro teplotně citlivé výrobky, kde díky necitlivé změně teploty může dojít ke znehodnocení výrobků. Jednotných podmínek při zpracování bývá dosaženo tím, že plyn (nejčastěji vzduch a vodní pára) vstupují přes vrstvu (fluidní rošt) do nádoby (fluidizační komora) za kontrolovaných podmínek a vytváří tak fluidní vrstvu, při které dochází například k sušení či chlazení. Teplo je do fluidní vrstvy dodáváno přes proudící plyn, který je ohříván či ochlazován pomocí výměníku tepla. Proudící plyn ovšem nemusí být jediným zdrojem energie. Teplo může být přiváděno také pomocí otopných ploch (panelů nebo trubek), které mohou být ponořeny ve fluidní vrstvě. Tyto plochy mohou být využity také ke chlazení. Sušení ve fluidních vrstvách přináší řadu výhod oproti jiným metodám sušení sypkých materiálů. K přepravě sypkých materiálů se využívá v některých případech kombinace fluidizace a vibrace.

Výhody sušení sypkých materiálů pomocí fluidizace:

- Díky intenzivnímu směšování dochází k rovnoměrnému ohřevu vysoušeného materiálu.
- Je možné sušit teplotně citlivé materiály, nedochází k rychlému ohřátí a přehřátí, které negativně ovlivňuje vlastnosti citlivého materiálu.
- Fluidizace je vhodná k sušení velice malých částí, prášků a granulí o rozměrech mezi 50 až 5000 mikrony. U velmi jemných a lehkých částic, se často kombinuje fluidizace s vibrací.

2.2. Fluidní vrstva

Fluidní vrstva je považována za disperzní systém. Vytvoření takové fluidní vrstvy je velmi složitým procesem, který vyžaduje mnoho zkušeností. Při průtoku plynu nádobou s pórovitým dnem naplněnou vrstvou částic, může dojít v určité fázi k rovnováze mezi aerodynamickými silami a tíhou částic. Tyto částice se postupně uvolňují a začínají se pohybovat směrem vzhůru. Takový stav označujeme jako vznik fluidní vrstvy. Další zvýšení průtoku vede ke zvýšení rychlosti částic a k následnému intenzivnímu směšování mezi částicemi v celém objemu, který v nádobě vyplňují. Dynamická rovnováha systému je pak zachována a vrstva jako celek nabývá vlastností, které jsou typické pro kapaliny, ačkoliv se jedná o pevné látky. Dosáhne-li rychlost plynu, který je současně vtlačován do nádoby s částicemi určenými k sušení, jisté hodnoty, při které aerodynamické síly překonají působení gravitace, jsou vysušované částice ze svého dosavadního prostoru unášeny z nádoby pryč. Jedná se o druhý mezní stav existence fluidní vrstvy.

Při fluidizaci v plynech vzniká nerovnoměrná (nehomogenní) fluidní vrstva, vyznačující se tím, že koncentrace částic se v každém místě vrstvy mění s časem, tudíž nedochází ke stejnoměrnému rozložení plynu v průřezech vrstvy, což znamená, že nedokážeme určit přesný pohyb částic.

2.3. Základní druhy fluidních vrstev

K nejvýhodnějším a nejčastěji používaným fluidním vrstvám patří *vroucí a kypící* fluidní vrstva (viz níže). V praxi se můžeme setkat i s jinými typy fluidních vrstev. Další typy fluidních vrstev vznikají v důsledku velké vlhkosti, nestejně velikosti částic apod. Ale tyto vrstvy jsou již nevhodné, z důvodu nízké kvality rozptylu částic (na rozdíl od výše zmíněných fluidních vrstev). Naším cílem je obvykle se těmto fluidním vrstvám vyhnout. Pro přehlednost jsou jednotlivé vrstvy znázorněny na obr. č. 1.

Vroucí fluidní vrstva

Pro tuto vrstvu je charakteristická poměrně klidná hladina, dobře změřitelná, nepřilíš narušena bublinami, jejichž velikost je ve srovnání s rozměry hladiny minimální. Vroucí fluidní vrstva je vhodná k průmyslovým aplikacím, například při spalování a sušení.

Kypící fluidní vrstva

Kypící vrstva se vyznačuje rozrušenou obtížně změřitelnou hladinou. Rozrušení hladiny je způsobeno tryskáním a velkými bublinami plynu. Při takovémto rozrušení se výška hladiny stanovuje velice těžko. V kypící vrstvě ovšem dochází k nejintenzivnějšímu směšování, což je výhodné použít především při sušení.

Pístitující fluidní vrstva

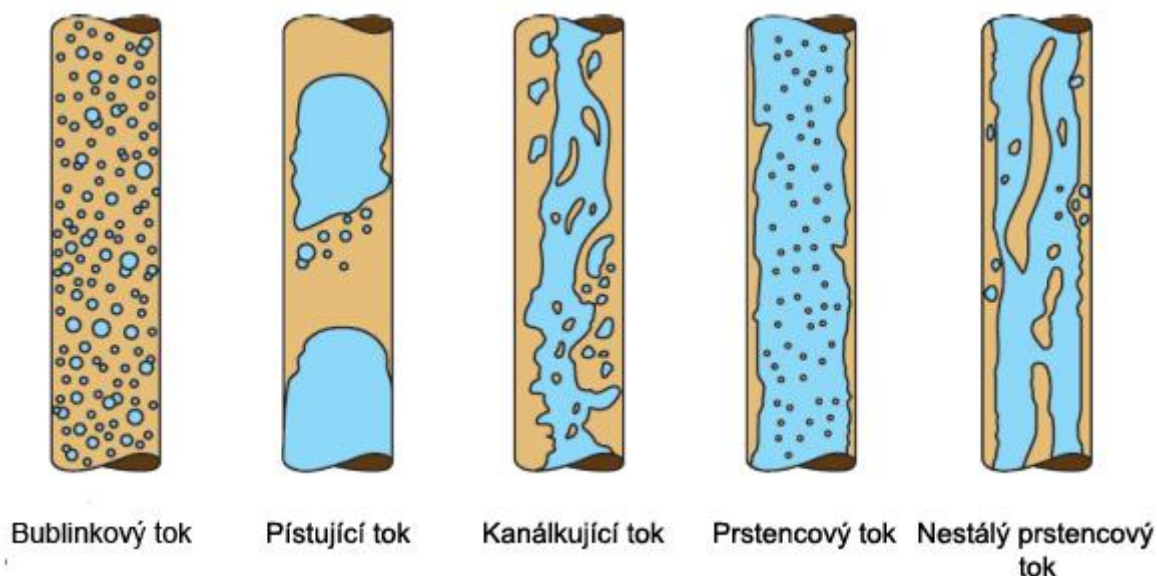
Tato vrstva je typická pro kanály a nádoby malého průměru, bubliny plynu tvoří shluky, které se navenek chovají jako písky. V praxi se tudíž snažíme, aby k vytvoření takovéto vrstvy docházelo co nejméně.

Kanálkující fluidní vrstva

Dalším nežádoucím typem fluidní vrstvy je i *kanálkující* vrstva. S touto vrstvou se můžeme setkat například při fluidizaci vlhkých částic. Je nehybná a plyn si v ní pouze vytvoří tzv. kanálky, kterými prochází. Jejím vzniku se snažíme při průmyslovém využití předejít.

Třídící fluidní vrstva

Třídící fluidní vrstva vzniká v důsledku nestejně velikosti částic nebo rozdílné hmotnosti částic. Obvykle na ni narazíme tam, kde se nachází částice různých velikostí a hmotností. Tato vrstva se projevuje tím, že malé a lehké částice se umístí na hladině vrstvy a větší a objemnější částice jsou umístěny hlouběji blíže ke dnu.



Obr. 1: Dvoufázové proudění

2.4. Procesy ve fluidní vrstvě

Fluidní vrstva má ze všech disperzních teplosměnných systémů nejrozsáhlejší aplikační možnosti, a proto fluidní technika zasahuje stále pronikavěji do mnoha průmyslových oborů, např. spalování, sušení atd.

Ve fluidní vrstvě dochází ke třem základním procesům – mechanickým, chemickým a tepelným.

Mezi *mechanické* procesy patří transport částic ve fluidních žlebech, ve vertikálních kanálech, třídění, separace částic, granulace a míchání částic.

Do kategorie *chemických* procesů lze zařadit homogenní reakce v plynné fázi s tuhou látkou jako s teplotnosným prostředkem, heterogenní reakce (kdy částice slouží jako katalyzátor) a heterogenní reakce mezi plynem a tuhými částicemi.

Mechanické a *chemické* procesy bývají v mnoha aplikacích úzce vázány na tepelné procesy.

Z hlediska *tepelných* procesů má fluidní vrstva specifické vlastnosti, které můžeme požadovat za výhodné, ale v některých případech za nevhodné.

Pohyb částic ve fluidní vrstvě

Stoupající bubliny plynu s sebou vynášejí směrem od rozdělovacího roštu k horní hladině částice, které mimo proud bublin klesají zpět. Stochastický charakter tohoto jevu, který se neustále opakuje a okolnost, že průchod bublin je příčinou příčného,

radiálního přemísťování částic, způsobují, že fluidní vrstva je v podstatě dokonalým směšovacím zařízením pro částice. Hodnoty součinitele přestupu tepla mezi jednozrnnými částicemi a plynem jsou poměrně vysoké. Důsledkem toho se teplota částic velmi rychle vyrovnává s teplotou plynu. Fluidní vrstvu proto charakterizují vysoké hodnoty součinitele relativní tepelné vodivosti (řádově $10^3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) a to, že teplota vrstvy v celém jejím objemu je téměř konstantní.

Rovnoměrnost teplotního pole ve fluidní vrstvě je pro určité aplikace velmi výhodná. V případě kontinuálních pochodů je nejvýhodnější použít protiproudý režim. Interakce částic a plynu znamená směšování částic degradaci vstupního potenciálu. Tento problém lze obejít za použití víceúrovňových protiproudých uspořádání. Další zajímavou vlastností fluidní vrstvy jsou poměrně vysoké hodnoty součinitele přestupu tepla mezi vrstvou, ponořenými tělesy a stěnami omezujícími vrstvu. Tato vlastnost dává dobré předpoklady k řadě tepelně technických aplikací.

2.5. Konstrukční provedení fluidních komor

Fluidní komory se nejčastěji konstruují pro kontinuální a dávkový provoz. Existuje několik způsobů, jak přichází materiál určený k sušení do komory. Nejčastěji bývají komory kruhového nebo čtvercového tvaru.

Základní konstrukční typy, které se v praxi používají:

Komora s kontinuálním zpětným mísením (Continual Back-mixing)

Tento způsob se používá v případě, kdy přiváděný materiál není možné fluidizovat přímo, fluidizace nastává později například po odstranění povrchové vlhkosti částic. Podmínkou je udržení materiálu dlouho pod bodem vzniku fluidní vrstvy. Teplota a vlhkost je konstantní díky vlastnostem na fluidní vrstvě. Ke zvýšení intenzity fluidizace se používá topných těles ponořených do fluidní vrstvy. (Zpětné mísení je zobrazeno na obr. 2 a)).

Komora s pístovým tokem (Plug flow design)

Pístový tok se používá pro materiály, které jsou určeny k přímé fluidizaci. Pístového toku se dosahuje pomocí přepážek ve fluidizační komoře, které brání pohybu částic ve vodorovném směru. Komory pro pístující tok bývají nejčastěji obdélníkového nebo kruhovitého tvaru a používají se při odstraňování vlhkosti nebo při chlazení. Pístujícího toku může být dosaženo několika způsoby v závislosti na velikosti a tvaru fluidní komory.

- U obdélníkového tvaru komory jsou přepážky umístěny tak, aby rozdělávaly tok ze strany na stranu.
- U kruhového tvaru komory jsou umístěny přepážky do spirály.

- V případě velmi malých komor jsou přepážky radiální.

(Komora s pístovým tokem je zobrazena na obr. 2 b)).

Vibro-fluidizační komora (Vibration fluid beds)

Tento typ fluidní komory vychází konstrukčně z komory s pístujícím tokem. Je však doplněna o vibrační agregát, který doplňuje účinek fluidizace o vibrace. Výška fluidizační vrstvy je v tomto případě mnohem nižší. Vrstva dosahuje výšky maximálně 200 mm. Díky malé výšce fluidní vrstvy a velké ploše, dochází k úspoře času potřebného pro vysušení, ve srovnání s nevibrující fluidní komorou, kde se výška vrstvy pohybuje až okolo 1500 mm. Vibračně-fluidní komora je určena zejména k sušení a chlazení částic, které jsou obtížněji fluidizovatelné díky velkým rozdílům ve velikosti částic, nebo díky částicím s nepravidelným tvarem. Tento typ je také vhodný k sušení částic, které vyžadují relativně malou rychlost fluidizace, z důvodu abraze materiálu. (Komora je zobrazena na obr. 2 e))

Kontaktní fluidní komora (Contact fluidization)

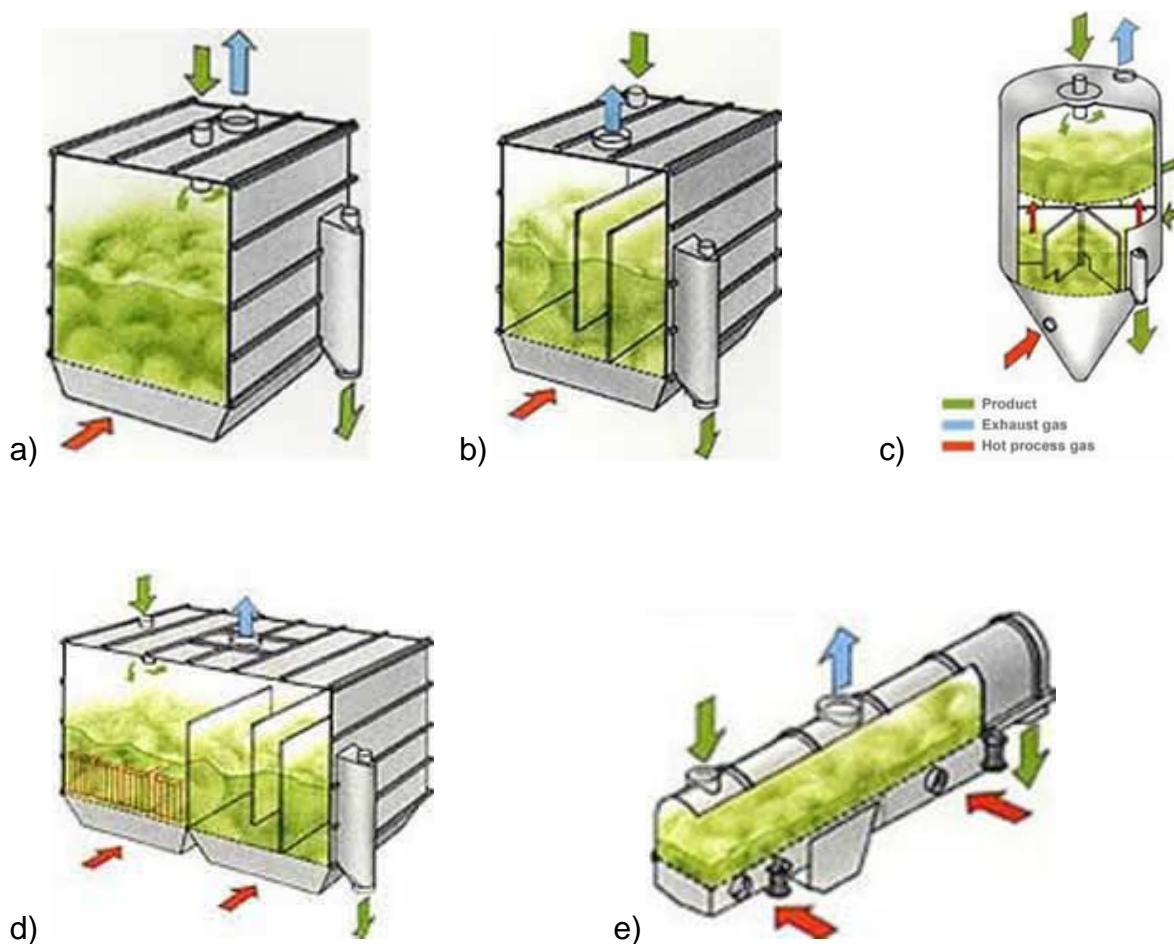
Jedná se o kombinaci fluidní komory se zpětným tokem a komory s pístovým tokem. Vháněné vlhké sytké částice jsou rozptýleny rovnoměrně rotačním agregátem přes část komory se zpětným tokem. Tato část je vybavena topnými deskami, které dostatečně zásobují vrstvu teplem, a proto je možné snížit teplotu topné desky i teplotu proudící média na minimum. Tato úprava je zvláště výhodná pro tepelně citlivé sytké materiály. Část komory s pístujícím tokem je určena k dosušování či dochlazování, je-li to potřeba (obr. 2 d)).

Víceřadé komory (Multi-tier fluid beds)

Víceřadé komory se skládají obvykle ze dvou vrstev. Ve spodní vrstvě dochází k předsušení a v horní vrstvě dochází k dosušování. Sušící plyn proudí protiproudem vzhledem k vysoušenému materiálu. Plyn, který odchází ze spodní vrstvy, přenáší teplo, které přechází do horní vrstvy. Víceřadé fluidní komory jsou nejčastěji válcového typu a často bývají vybaveny otopnými plochami. Tyto sušárny mají vyšší účinnost a jsou velice vhodné k použití při uzavřeném sušení. (Víceřadá fluidizační komora je zobrazena na obr. 2 c)).

Fluidizační zařízení se velice často používají v potravinářství a v chemické výrobě, kde je zapotřebí co nejvyšší čistoty a dodržování hygienických norem a nařízení. Komory do těchto provozů jsou vybaveny rošty se zaoblenými rohy pro snadné čištění. Ve větších provozech jsou komory vybaveny též samočištěním.

V chemických provozech bývají často řešeny fluidizační komory jako uzavřené z důvodu odpařování rozpouštědel a dalších nebezpečných látek.



Obr. 2: Konstrukční provedení fluidních komor

Konstrukční provedení fluidních komor:

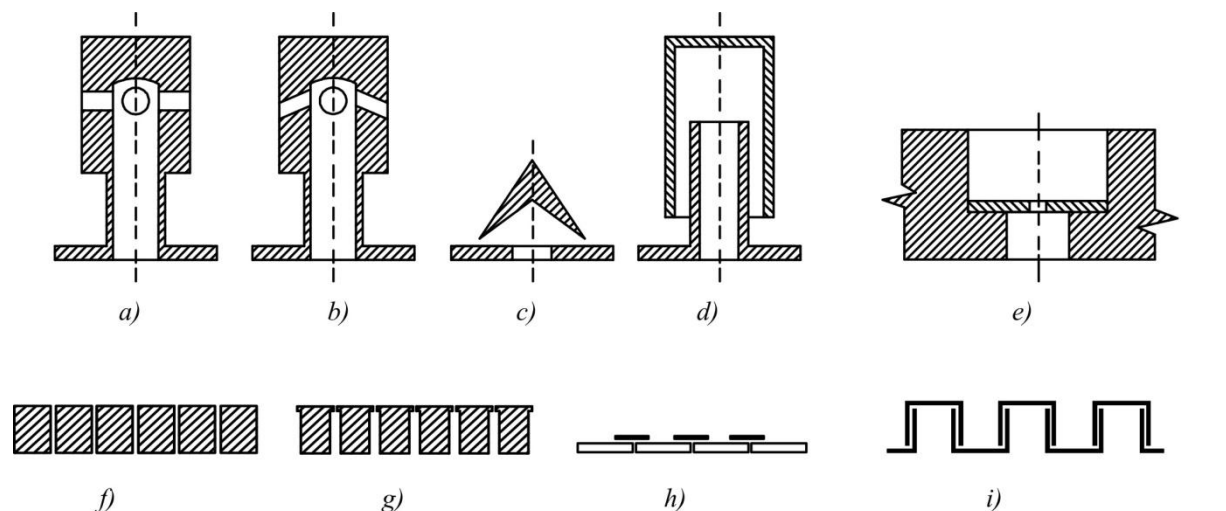
- a) *Komora s kontinuálním zpětným mísením*
- b) *Komora s pístovým tokem*
- c) *Víceřadá fluidní komora*
- d) *Kontaktní fluidní komora*
- e) *Vibro-fluidizační komora*

2.6. Aerodynamika fluidní vrstvy, fluidní rošť

Plyn se přivádí do fluidní vrstvy pomocí zařízení, které nazýváme fluidní rošť. V některé literatuře může být toto zařízení také označováno jako rozdělovací rošť. Rošty zabezpečují správný chod fluidizace a určují požadované rozdělení plynu v průběhu pracovního procesu.

Konstrukční provedení roštů

Konstrukce fluidních roštů je velice různorodá, tvar a rozměry roštů závisí na mnoha faktorech, zejména však na způsobu použití. Jedním z důležitých faktorů je také teplota, při které procesy na roštu probíhají. Často se provozním podmínkám musí přizpůsobit i materiál roštu. Nejjednodušší rošty bývají tvořeny jen děrovanou nebo pórovitou deskou, popřípadě profily. U jednoduchých typů roštů dochází k menším tlakovým ztrátám, jejich výrobní cena je příznivá, ovšem velmi často dochází k propadání částic rozdělovacím roštem. K zabránění propadu částic se používají složitější, nejčastěji bezproudové a kloboučkové fluidní rošty.



a,b,c,d - různé varianty kloboučkových roštů, e - děrovaná deska, f,g - soustava tyčí, h,i - bezpropadové rošty

Obr. 3: Konstrukční provedení roštů

Tlaková ztráta na fluidním roštu

$$\frac{\Delta p_F}{h_p} = (1 - \varepsilon_p)(\rho_m - \rho_g)g, \quad \text{Vzorec (2.1)}$$

kde

Δp_F ... tlaková ztráta fluidní vrstvy [MPa]

h_p ... výška vrstvy na prahu fluidizace [m]

ε_p ... mezerovitost [-]

ρ_m ... hustota fluidujícího materiálu [kg/m³]

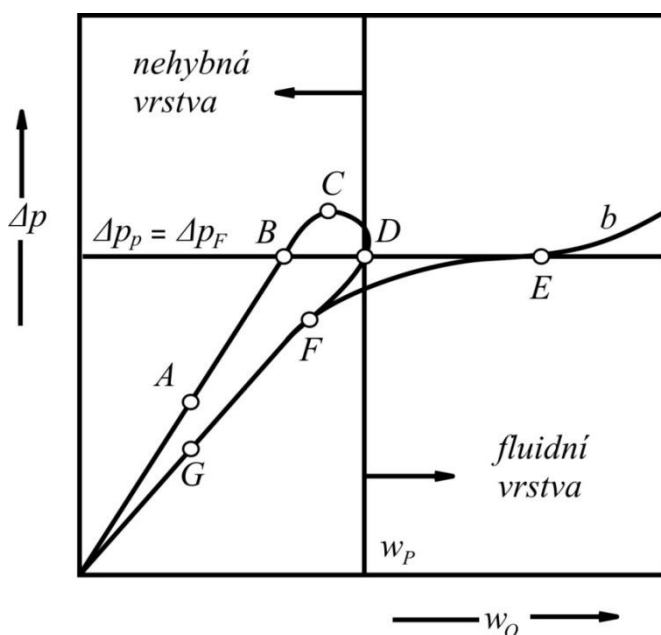
ρ_g ... hustota plynu [kg/m³]

g ... gravitační zrychlení [m/s²]

Doporučuje se navrhovat fluidní rošt tak, aby jeho tlaková ztráta Δp_R byla v určitém poměru k tlakové ztrátě na fluidní vrstvě Δp_F . Určení tohoto poměru není jednoznačné, nejčastěji se volí pro průmyslová zařízení poměr $\frac{\Delta p_R}{\Delta p_F}$ od 0,02 do 0,5. Z tohoto doporučeného poměru se vychází v řešení této diplomové práce.

2.7. Tlakový diagram fluidní vrstvy

V tlakovém diagramu můžeme sledovat podrobněji tlakové ztráty v okolí vzniku vrstvy. U nehybné vrstvy částic je přírůstek tlakové ztráty s mimovrstvovou rychlostí lineární nebo parabolický a to až do bodu B, kdy tlaková ztráta dosáhne zdánlivé hodnoty rovné hmotnosti náplně částic vztažené na 1 m^2 průřezu vrstvy. Počáteční výška násypu zůstává zatím zachována. Po překročení bodu B nastává obvykle mírná expanze vrstvy, takže vzrůst tlakové ztráty se zpomalí. Při průtoku plynu odpovídající bodu C je již vrstva uvolněna natolik, že při dalším nepatrném zvýšení rychlosti plynu se částice přestávají dotýkat. Tlaková ztráta vrstvy poklesne na stejnou hodnotu, jako byla v bodě B a zůstává přibližně stejná, zatímco expanze vrstvy pokračuje. Počáteční lehký vibrační pohyb částic se změnil na typický cirkulační pohyb zasahující celý objem vrstvy a určitý podíl plynu začne stoupat vrstvou ve formě bublin. Při přechodu od fluidní vrstvy k nehybné vrstvě (při postupném snižování rychlosti) sleduje tlaková ztráta čáru EFG. Převýšení tlaku mezi body B a C je vyvoláno potřebou narušit soudržnost vrstvy a závisí mimo jiné na mezerovitosti prvního násypu. To naznačuje, že čára ABC nemusí být reprodukovatelná při dalším experimentu se stejnými částicemi. Reprodukce sestupné větve je však reprodukovatelná poměrně spolehlivě. Je velice těžké stanovit práh neboli počátek fluidizace. Většinou se však uvažuje, že minimální rychlost potřebná ke vzniku fluidní vrstvy, tzv. prahová rychlost fluidizace, odpovídá bodu D. Čára GDE se označuje jako ideální pro fluidizaci.



Obr. 4: Průběh tlaku v okolí prahu fluidizace

Ve skutečnosti často nebývá tlaková ztráta za bodem D přesně konstantní, během experimentu se může objevit nevýrazný vzrůst Δp_F až k jisté konstantní hodnotě, nebo slabé kolísání Δp_F v blízkosti bodu D. Pozdější vzestupný průběh podle čáry b ukazuje na to, že ve vrstvě existují již větší bubliny plynu, nebo že dochází k pístování. U polydisperzní vrstvy se závislost tlakové ztráty na mimovrstvové rychlosti přibližuje křivce GFE.

2.8. Výpočet prahové rychlosti

Ve fluidní vrstvě dochází ke vznosu částic pomocí vháněného média. Médium se vhání do prostoru zaplněného částicemi, kde dochází k jejímu vznosu. Množství přiváděného média je závislé na výšce násypu neboli výšce nehybné vrstvy. Čím je nehybná vrstvy vyšší, tím působí větším odporem proti přiváděnému médiu a způsobuje větší tlakovou ztrátu. Při dosažení prahové rychlosti fluidizace dochází k protržení nehybné vrstvy a vrstva se stává fluidní. Fluidní vrstva se vyznačuje tím, že se v mnohém chová jako kapalina a přebírá její vlastnosti. Při protržení nehybné vrstvy dochází k poklesu tlakové ztráty a rychlost média se blíží rychlosti úletu, proto je nezbytné množství přiváděného média snížit. Rychlost úletu je hraniční rychlost, při níž nejjednodušší částice opouštějí fluidní vrstvu a odlétají. Z tohoto vyplývá, že optimální provoz fluidní vrstvy je v rozmezí prahové rychlosti fluidizace a rychlosti úletu. Tento poznatek charakterizují křivky závislosti Reynoldsových čísel na Archimédově čísle.

Při odvození vztahů pro prahovou rychlost fluidizace se vychází z rovnice dynamické rovnováhy

$$w_p = \sqrt{\frac{g \cdot d \cdot \varepsilon_p^3}{3\xi}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_m - \rho_g}{\rho_g}} g, \quad \text{Vzorec (2.2)}$$

kde

w_p ... prahová rychlost fluidizace [m/s]

d ... průměr částice [m]

ξ ... součinitel odporu v nehybné vrstvě [-]

vynásobíme-li rovnici poměrem d/v_g dostaneme kritériální závislost. Pomocí této kritériální závislosti jsme schopni vyjádřit Reynoldsovo číslo na prahu fluidizace

$$\text{Re}_P = \frac{w_p d}{\nu_g} = \sqrt{\frac{\varepsilon_p^3}{3\xi}} \sqrt{Ar}, \quad \text{Vzorec (2.3)}$$

kde

Re_p ... Reynoldsovo číslo na prahu fluidizace [-]

ν_g ... kinematická viskozita [m^2/s]

Ar ... Archimédovo číslo vztažené na velikost částice [-],

kde Archimédovo číslo vztažené na průměr částice

$$Ar = \frac{gd^3}{\nu_g^2} \frac{\rho_M - \rho_g}{\rho_g}. \quad \text{Vzorec (2.4)}$$

Z podmínky rovnováhy vnějších sil působících na kulovou částici padající konstantní rychlostí w_k v daném prostředí získáme závislost

$$Re_k = \frac{w_k d}{\nu_g} = \sqrt{\frac{4}{3\xi}} \sqrt{Ar}, \quad \text{Vzorec (2.5)}$$

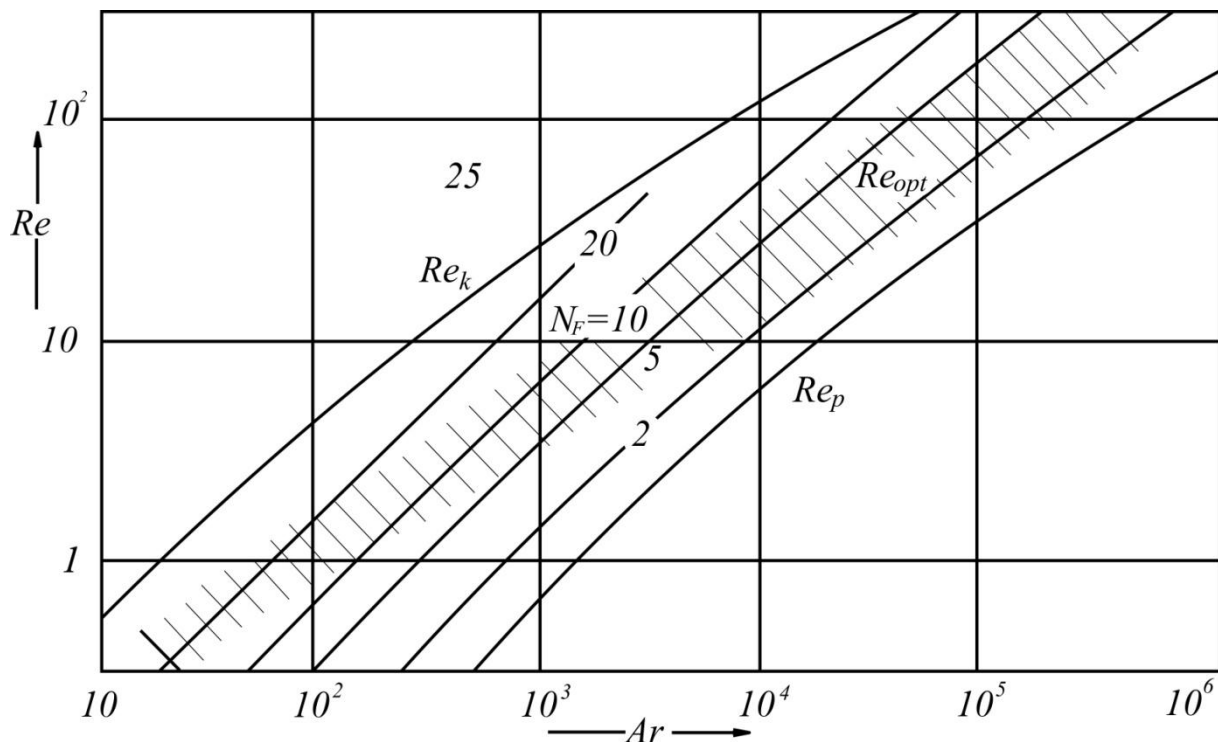
kde

Re_k ... je Reynoldsovo číslo úletu [-]

w_k ... pádová rychlost částice [m/s]

Reynoldsovo číslo úplavu charakterizuje únos částic z fluidní vrstvy, dosazením vhodných výrazů za součinitele odporu ξ dostaneme závislost Re_k jen na Archimédově čísle

$$Re_k = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}, \quad 10^{-2} < Ar < 107. \quad \text{Vzorec (2.6)}$$



Obr. 5: Závislost Reynoldsova čísla na Archimédově čísle

V praxi často nemůžeme počítat s tím, že všechny částice ve fluidní vrstvě mají stejnou velikost, pokud bude poměr největších a nejmenších částic $\frac{d_{MAX}}{d_{MIN}} \leq 2$, pak můžeme použít stejný vztah pro výpočet prahové rychlosti, ale průměr částic musíme korigovat

$$d_e = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}, \quad \text{Vzorec (2.7)}$$

kde

n_i ... počet částic [-]

d_i ... velikost částice [m]

d_e ... ekvivalentní průměr částice [m]

2.9. Přenos tepla a hmoty

Fluidní vrstva má řadu společných vlastností s kapalinami, přenos tepla a hmoty je obdobný jako u kapalin. V úvahu tedy musíme brát přenos tepla mezi ponořenými tělesy, nebo stěnami fluidní komory. Na přenosu tepla se podílí kontaktní přenos tepla mezi teplosměnným povrchem a shluky částic v jeho blízkosti. V kombinaci

s vedením tepla v mezní vrstvě plynu. Určitý vliv má také přenos tepla mezi částicemi a plynem. Matematické popsání těchto dějů je velice obtížné, a proto se hodnoty stanovují na základě experimentů.

Přenos tepla a hmoty mezi částicemi

Metody používané k měření součinitelů přestupu tepla můžeme nejčastěji rozdělit do dvou skupin. Stacionární metody přenosu tepla pracují s částicemi, které jsou kontinuálně přiváděny do vrstvy o určité teplotě t_{m1} , a tyto částice z vrstvy také odcházejí a to o teplotě t_m . Dalším způsobem je práce s neměnnou vrstvou částic, které jsou ochlazovány nebo ohřívány na teplotu t_m . Experimenty pro zjištění součinitele přestupu tepla se provádějí nejčastěji v úseku stálé rychlosti sušení. V případě dokonalého mísení částic v prostoru vrstvy bude podíl rozdílů vstupní teploty plynu t_{g1} a teploty vrstvy t_m a rozdíl výstupní teploty plynu t_{g2} a teploty vrstvy t_m dán vztahem

$$\frac{t_{g1} - t_m}{t_{g2} - t_m} = \exp\left(\frac{\alpha \cdot S}{W_g}\right), \quad \text{Vzorec (2.8)}$$

kde

S ... teplosměnný povrch částic [m^2]

$\frac{\alpha \cdot S}{W_g}$... bezrozměrný součinitel [-]

t_m ... teplota vrstvy [K]

t_{g1} ... vstupní teplota plynu [K]

t_{g2} ... výstupní teplota plynu [K]

Z nestacionárních metod se nejvíce využívá metoda jednorázového ohřevu nebo ochlazení vrstvy. Označíme-li vstupní teplotu plynu t_{g1} a výstupní teplotu plynu t_{g2} , dále pak vstupní teplotu vrstvy t_{M1} a výstupní teplotu vrstvy t_M , bude platit

$$\frac{t_m - t_{g1}}{t_m - t_{M1}} = \exp(-p\tau), \quad \text{Vzorec (2.9)}$$

kde

τ ... je doba ohřevu [s]

t_{M1} ... vstupní teplota vrstvy [K],

kde

$$\frac{t_{g1} - t_{g2}}{t_{q} - t_{M1}} = p \cdot \frac{w_M}{w_g} \exp(-p\tau), \quad \text{Vzorec (2.10)}$$

kde

w_g ... rychlost plynu [m/s]

w_M ... rychlost média [m/s].

Dobu potřebnou k ohřevu získáme jako

$$\tau = \frac{w_M}{w_g} \ln \frac{t_{m1} - t_{g1}}{t_{m} - t_{m1}}. \quad \text{Vzorec (2.11)}$$

Z daného vztahu vyplývá, že doba ohřevu není závislá na součiniteli přestupu tepla.

Přesnost obou metod je však omezena vztahem

$$\frac{\alpha \cdot S}{W_g} \leq 3. \quad \text{Vzorec (2.12)}$$

Z výše uvedeného vztahu vyplývá, že k vyrovnání teploty plynu a částice dojde na relativně malém úseku. A proto výsledky získané v relativně malých vrstvách se nemusejí shodovat s výsledky získanými ve vrstvách mnohem vyšších.

Přestup tepla mezi fluidní vrstvou a teplosměnným povrchem

Závislost součinitele přestupu tepla na mimovrstvové rychlosti v případě tzv. vnějšího přenosu tepla ve fluidní vrstvě má svůj charakteristický průběh. Kvalitativně podobný bez ohledu na to, zda se jedná o stěny fluidní komory, vodorovné či vertikální svazky trubek a podobně. Při mimovrstvové rychlosti $w_o > w_p$ hodnoty

součinitele přestupu tepla α poměrně rychle vzrůstají až k určitému α_{\max} při tzv. optimální mimovrstvové rychlosti w_{opt} a pak dále s rostoucí mimovrstvovou rychlostí klesají.

$$\text{Re}_{\text{opt}} = \frac{w_{\text{opt}} d}{\nu} = \frac{Ar}{18 + 5,22\sqrt{Ar}}, \quad \text{Vzorec (2.13)}$$

kde

Re_{opt} ...optimální Reynoldsovo číslo [-].

Tento vztah má podobnou formu jako některé rovnice pro prahovou rychlost fluidizace. Pro výpočet lze použít i jednodušší závislost

$$\text{Re}_{\text{opt}} = k\sqrt{Ar}, \quad Ar > 10^3, \quad \text{Vzorec (2.14)}$$

kde

k ... konstanta [-]

Konstanta K nabývá hodnot v rozmezí od 0,1 do 0,5. Hodnoty Re_{opt} jsou zobrazeny na obr. 3. Při vyšších hodnotách Ar se přibližují Re_k , při nižších hodnotách Ar pak k Re_p .

Tab. 1: Hodnoty konstanty K

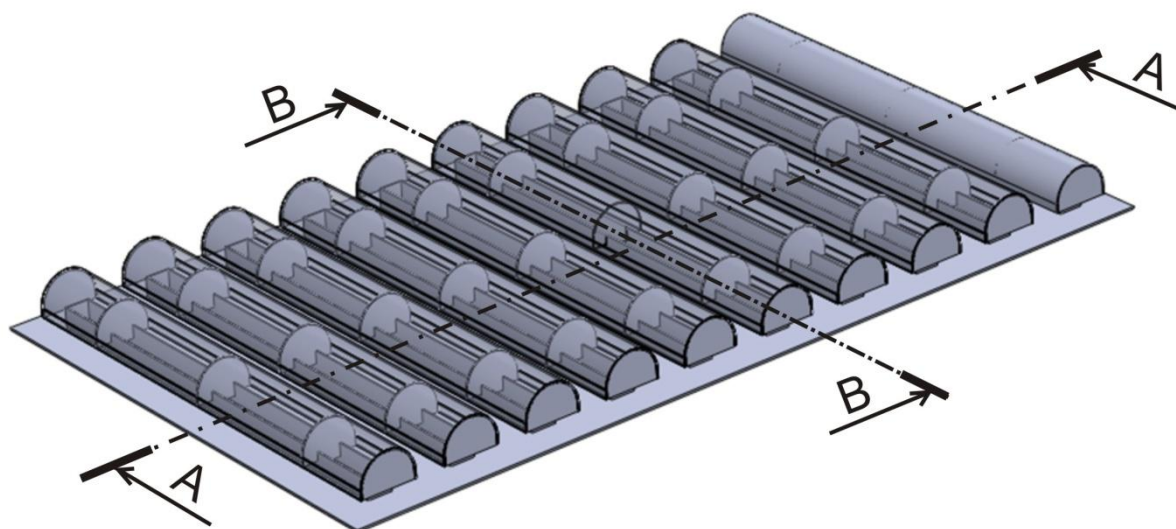
Hodnoty konstanty K	
Vertikální trubky, vertikální stěna	$K=3,3$
Horizontální trubky	$K=3,0$
Spirální trubky	$K=2,7$
Kulové tělo	$K=3,1$

Maximální hodnoty součinitele přestupu tepla nabývají nejčastěji hodnot mezi 300 až 700 $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$.

3. Návrhy roštů

Cílem diplomové práce je navrhnout rošt, který bude splňovat podmínky pro fluidizaci. Při návrhu takového fluidního zařízení bylo bráno v potaz mnoho technických parametrů, ať už jsou mezi návrhovými parametry provozní podmínky či tlaková ztráta, důležitým kritériem pro volbu roštu se stává také ekonomická výhodnost daného řešení. V průběhu řešení byly podrobeny bližšímu zkoumání tři fluidní rošty, z kterých byl vybrán ten nejvýhodnější, jak z technologického, tak ekonomického hlediska.

První rošt se skládá ze základní desky a deseti segmentů, které se základní deskou spojují otvory obdélníkového tvaru o rozměrech 450 x 26 mm. Otvory uvnitř základní desky proudí médium (v našem případě vzduch a mírně přehřátá pára) do jednotlivých segmentů, kde je médium pomocí příček rozděleno do čtyř částí. Příčky uvnitř jednotlivých segmentů nejen že rozvádějí médium a dochází tak k rovnoměrnějšímu proudění, ale navíc zvyšují tuhost celé konstrukce. Rozměry fluidního roštu včetně výkresové dokumentace byly dodány společností Tenza, a.s.



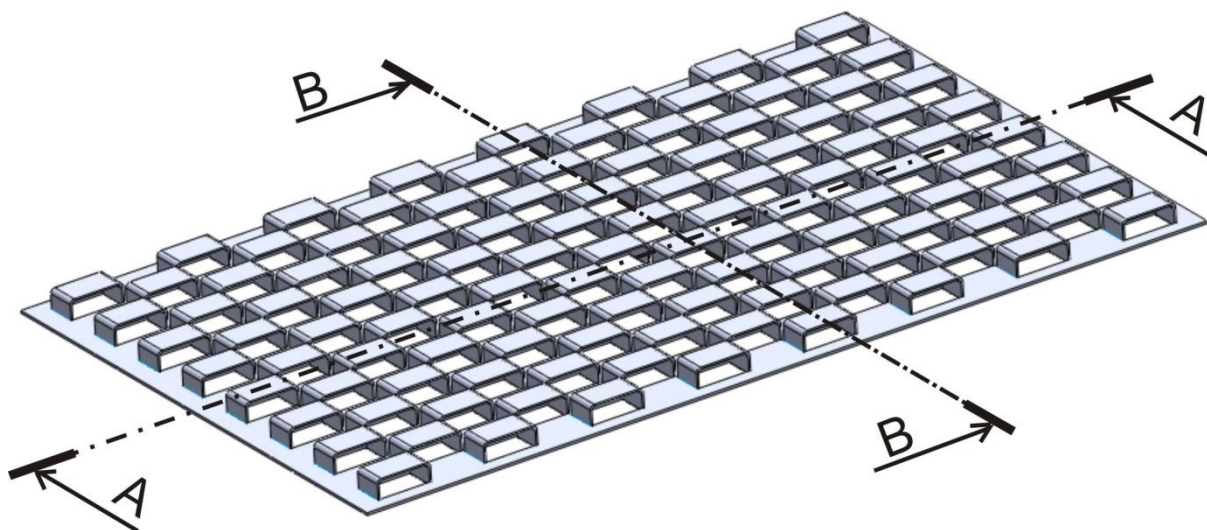
Obr. 6: Fluidní rošt dodaný společností Tenza, a.s.

Zbývající rošty byly navrženy autorem diplomové práce a pomocí výpočetních programů na bázi CFD byla potvrzena jejich funkčnost a vhodnost, případně bylo zjištěno, že navržený rošt nevyhovuje zadaným požadavkům a je naprosto nevhodný pro dané účely.

Druhý rošt, který je zmiňován v diplomové práci byl navržen autorem diplomové práce, který se snažil rošt co nejvíce zjednodušit, aby bylo dosaženo co nejnižší výrobní ceny při zachování dobrých provozních vlastností.

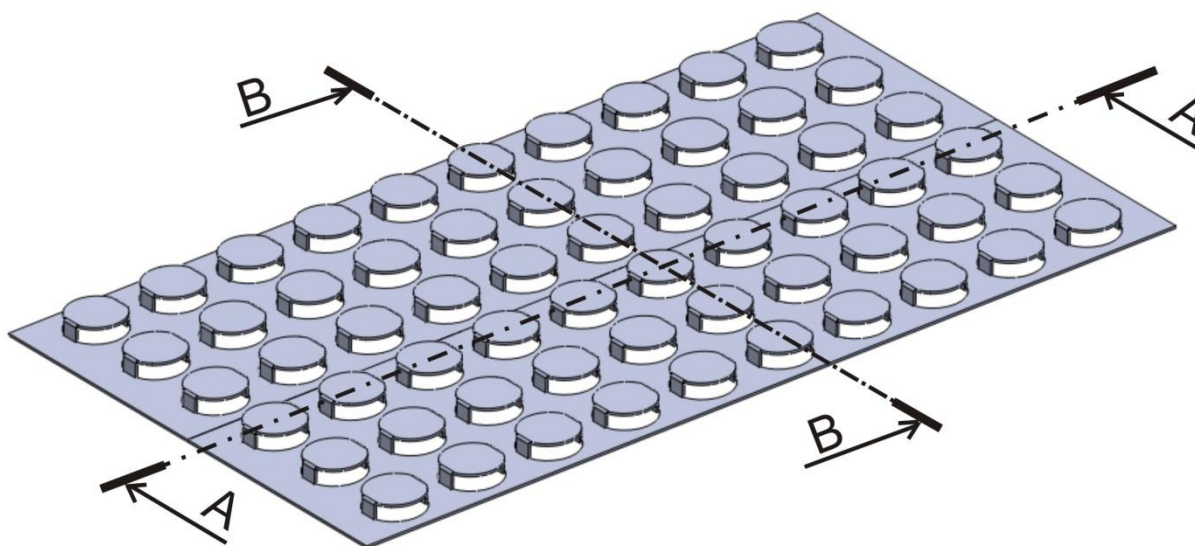
Rošt obsahuje základní desku se 113-ti otvory. V jednotlivých otvorech jsou vloženy jednoduché segmenty. Tyto segmenty jsou vystřiženy z plechového pásu, ohnuty do požadovaného tvaru a přivařeny pomocí bodového svařování na spodní stranu roštu. Vstupní médium proudí otvory v základní desce a pomocí segmentů,

které brání médiu pokračovat ve stávajícím směru proudění, dochází ke změně směru proudění a k promíšení proudů z jednotlivých otvorů v základní desce mezi sebou.



Obr. 7: Rošt navržený na základě podkladů pro diplomovou práci I

Třetí rošt je také navržený autorem diplomové práce a v zásadě vychází z předchozího návrhu, oproti předchozímu návrhu se liší tvarem a počtem jednotlivých segmentů. Jednotlivé segmenty jsou v tomto případě vyšší a rozměrnější oproti případu s obdélníkovými segmenty.



Obr. 8: Rošt navržený na základě podkladů pro diplomovou práci II

Řezy v náhledech slouží k jednodušší orientaci ve výsledcích simulace, která je v kapitole 5.

4. Proudové křivky jednotlivých roštů

4.1. Parametry vstupních médií

Provozní parametry roštů byly dodány společností Tenza a.s. Upřesňující parametry jednotlivých médií nutné k výpočtu jako například tepelná vodivost a dynamická viskozita, byly dohledány v příslušných tabulkách. Pro vzduch byla použita tabelovaná data z Engineering toolbox¹, který se nachází na stránkách www.engineeringtoolbox.com, pro vodní páru bylo použito dat z National Institute of Standards and Technology², který se nachází na stránkách <http://www.nist.gov>. Jedná se o americkou společnost, která byla založena již v roce 1901, je podporována americkým ministerstvem obchodu a v současné době zaměstnává více než 2900 vědců. Její data jsou využívána k vědeckým a průmyslovým účelům.

Tab. 2: Vstupní parametry médií

	Provozní parametry roštů		
	Médium 1: Vzduch	Média 2: Vodní pára	Jednotka
Tlak	$p_V=0,1 \text{ MPa}$	$p_P=0,1 \text{ MPa}$	MPa
Průtok	$Q_V = 157,6 \text{ m}^3/\text{min}$	$Q_P=289 \text{ m}^3/\text{min}$	m^3/min
Vstupní teplota	$T_V = 110 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_P=110 \text{ }^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$
Hustota	$\rho_V = 1,2 \text{ kg/m}^3$	$\rho_P = 0,57 \text{ kg/m}^3$	kg/m^3
Molární hmotnost	$M_V = 28,96 \text{ kg/kmol}$	$M_P=18,02 \text{ kg/kmol}$	kg/kmol
Měrná tepelná kapacita	$c_{pV} = 1050 \text{ J/kg.K}$	$c_{pP} = 2041,5 \text{ J/kg.K}$	J/kg.K
Dynamická viskozita	$\eta_V = 1,73 \text{ Pa.s}$	$\eta_P = 1.2644\text{e-}05 \text{ Pa.s}$	Pa.s
Tepelná vodivost	$\lambda_V = 0,0243 \text{ W/m.K}$	$\lambda_P = 0.025767 \text{ W/m.K}$	W/m.K

4.2. Výpočet vstupních rychlostí do jednotlivých roštů

Pro výpočet a následnou simulaci v některém z CFD programů, v našem případě v programu Ansys CFX, je zapotřebí určit vstupní a výstupní parametry, tzv. okrajové podmínky. Jeden z nejdůležitějších parametrů pro stanovení vstupních okrajových

¹ Engineering Toolbox, Air Properties [cit. 10-2-2010]. Dostupné z WWW: <http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html>.

² National Institute of Standards and Technology, NIST Scientific and Technical Databases - Index [cit. 10-2-2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.nist.gov/data/index.html>>.

podmínek je rychlost média, které vstupuje do roštu. Tato rychlost se zjišťuje pomocí rovnice kontinuity, z které při dosazení průřezu jednotlivých vstupních kanálů je možné vypočítat požadovanou vstupní rychlost v každém z kanálů.

$$Q = S \cdot v \quad \text{Vzorec (3.1)}$$

4.3. Výpočet rychlostí pro první rošt

Tab. 3: Charakteristické vlastnosti prvního roštu

Rozměr vstupního kanálku	26 x 516 mm
Počet kanálků	$n_1=10$
Obsah vstupu	$S_{IN1}=0,013416 \text{ m}^2$
Celkový obsah vstupních ploch	$S_{CELKIN1}=0,13416 \text{ m}^2$
Rychlost média 1 (vzduch)	$Q_V=157,6 \text{ m}^3/\text{min}$
Rychlost média 2 (vodní pára)	$Q_P=289 \text{ m}^3/\text{min}$

a) Rychlost jednoho vstupu pro médium 1 (vzduch)

$$Q_v = S_1 \cdot v_{V1} \quad \text{Vzorec (3.2)}$$

$$v_{V1} = \frac{Q_v}{S_1} \quad \text{Vzorec (3.3)}$$

$$v_{V1} = 19,57 \text{ m/s} \quad \text{Vzorec (3.4)}$$

b) Rychlost jednoho vstupu pro médium 2 (pára)

$$Q_p = S_1 \cdot v_{P1} \quad \text{Vzorec (3.5)}$$

$$v_{P1} = \frac{Q_p}{S_1} \quad \text{Vzorec (3.6)}$$

$$v_{P1} = 35,90 \text{ m/s} \quad \text{Vzorec (3.7)}$$

Tab. 4: Vstupní rychlosti na roštu 1

Rychlost média 1 (vzduch) na vstupu	Rychlost média 2 (vodní pára) na vstupu
$V_{V1} = 19,57 \text{ m/s}$	$V_{P1} = 35,90 \text{ m/s}$

4.4. Výpočet rychlostí pro druhý rošt

Tab. 5: Charakteristické vlastnosti druhého roštu

Rozměr vstupu	34 x 64 mm
Počet vstupů	$n_2=113$
Obsah vstupu	$S_{IN2}=0,02176 \text{ m}^2$
Celkový obsah vstupních ploch	$S_{CELKIN2}=0,11968 \text{ m}^2$
Rychlost média 1 (vzduch)	$Q_V=157,6 \text{ m}^3/\text{min}$
Rychlost média 2 (vodní pára)	$Q_P=289 \text{ m}^3/\text{min}$

a) Rychlost jednoho vstupu pro médium 1 (vzduch)

$$Q_v = S_2 \cdot v_{V2} \quad \text{Vzorec (3.8)}$$

$$v_{V2} = \frac{Q_v}{S_2} \quad \text{Vzorec (3.9)}$$

$$v_{V2} = 10,68 \text{ m/s} \quad \text{Vzorec (3.10)}$$

b) Rychlost jednoho vstupu pro médium 2 (pára)

$$Q_p = S_2 \cdot v_{P2} \quad \text{Vzorec (3.11)}$$

$$v_{P2} = \frac{Q_p}{S_2} \quad \text{Vzorec (3.12)}$$

$$v_{P2} = 19,59 \text{ m/s} \quad \text{Vzorec (3.13)}$$

Tab. 6: Vstupní rychlosti na roštu 2

Rychlost média 1 (vzduch) na vstupu	Rychlost média 2 (vodní pára) na vstupu
$V_{V2}= 10,68 \text{ m/s}$	$V_{P2}= 19,59 \text{ m/s}$

4.5. Výpočet rychlostí pro třetí rošt

Při výpočtu vstupní rychlosti pro třetí rošt se postupovalo obdobným způsobem, jako u předchozích roštů, tj. z rovnice kontinuity, jen rozměry vstupního otvoru byly odečteny přímo z programu SolidWorks.

Tab. 7: Charakteristické vlastnosti třetího roštu

Rozměr vstupu	Složitější vstupní profil, parametry odečteny z programu SolidWorks
Počet vstupů	$N_3=60$
Obsah vstupu	$S_{IN3}=0,003848 \text{ m}^2$
Celkový obsah vstupních ploch	$S_{CELKIN3}=0,230907 \text{ m}^2$
Rychlost média 1 (vzduch)	$V_V=157,6 \text{ m}^3/\text{min}$
Rychlost média 2 (vodní pára)	$V_P=289 \text{ m}^3/\text{min}$

a) Rychlost jednoho vstupu pro médium 1 (vzduch)

$$Q_v = S_3 \cdot v_{V3} \quad \text{Vzorec (3.14)}$$

$$v_{V3} = \frac{Q_v}{S_3} \quad \text{Vzorec (3.15)}$$

$$v_{V3} = 11,38 \text{ m/s} \quad \text{Vzorec (3.16)}$$

b) Rychlost jednoho vstupu pro médium 2 (pára)

$$Q_P = S_3 \cdot v_{P3} \quad \text{Vzorec (3.17)}$$

$$v_{P3} = \frac{Q_P}{S_3} \quad \text{Vzorec (3.18)}$$

$$v_{P3} = 20,86 \text{ m/s} \quad \text{Vzorec (3.19)}$$

Tab. 8: Vstupní rychlosti na roštu 3

Rychlost média 1 (vzduch) na vstupu	Rychlost média 2 (vodní pára) na vstupu
$v_{V3} = 11,38 \text{ m/s}$	$v_{P3} = 20,86 \text{ m/s}$

4.6. Stanovení výstupní rychlosti z roštu

Okrajová podmínka na výstupu byla určena obdobným způsobem, tedy pomocí rovnice kontinuity. Z rovnice kontinuity vyplývá za předpokladu, že výstupní plocha mnohem větší musí být výstupní rychlost mnohem nižší, než je tomu u navrhovaných roštů.

Tab. 9: Charakteristické vlastnosti výstupního vedení

Rozměr výstupu	1050 x 600 mm
Obsah výstupní plochy	$S_{\text{výstup}}=0,63 \text{ m}^2$
Rychlost média 1 (vzduch)	$V_V=157,6 \text{ m}^3/\text{min}$
Rychlost média 2 (vodní pára)	$V_P=289 \text{ m}^3/\text{min}$

a) Rychlost médium 1 (vzduch) na výstupu z roštu

$$Q_v = S_{\text{výstup}} \cdot v_{\text{výstup}V} \quad \text{Vzorec (3.20)}$$

$$v_{\text{výstup}V} = \frac{Q_v}{S_{\text{výstup}}} \quad \text{Vzorec (3.21)}$$

$$v_{\text{výstup}V} = 4,17 \text{ m/s} \quad \text{Vzorec (3.22)}$$

b) Rychlost médium 2 (pára) na výstupu z roštu

$$Q_P = S_{\text{výstup}} \cdot v_{\text{výstup}P} \quad \text{Vzorec (3.23)}$$

$$v_{\text{výstup}P} = \frac{Q_P}{S_{\text{výstup}}} \quad \text{Vzorec (3.24)}$$

$$v_{\text{výstup}P} = 7,65 \text{ m/s} \quad \text{Vzorec (3.25)}$$

Tab. 10: Výstupní rychlosti na roštu

Rychlost média 1 (vzduch) na výstupu	Rychlost média 2 (vodní pára) na výstupu
$V_{\text{výstup}V} = 4,17 \text{ m/s}$	$V_{\text{výstup}P} = 7,65 \text{ m/s}$

Z výsledků je patrné, že rychlost média na výstupu je mnohem nižší než rychlost média při vstupu do roštu, což naznačuje, že podmínka kontinuity byla splněna.

4.7. Simulace proudění

Simulace proudění byla provedena pomocí programu Ansys CFX, který pracuje na principu metody konečných objemů. CFD metody pro simulaci proudění tekutin vychází z Navier-Stokesovy pohybové rovnice a z rovnice kontinuity. Při výpočtu byl použit turbulentní model k-epsilon a v některých sporných případech, kdy se vypočtené hodnoty lišily v řádu tisíců, bylo využito také modelu k-omega, neboť se zde objevilo důvodné podezření, že byl nevhodně zvolen turbulentní model a došlo k nesprávnému výpočtu. V závěru se však prokázalo, že turbulentní model k-epsilon a k-omega se pro daný rošt příliš neliší a přináší téměř shodné výsledky.

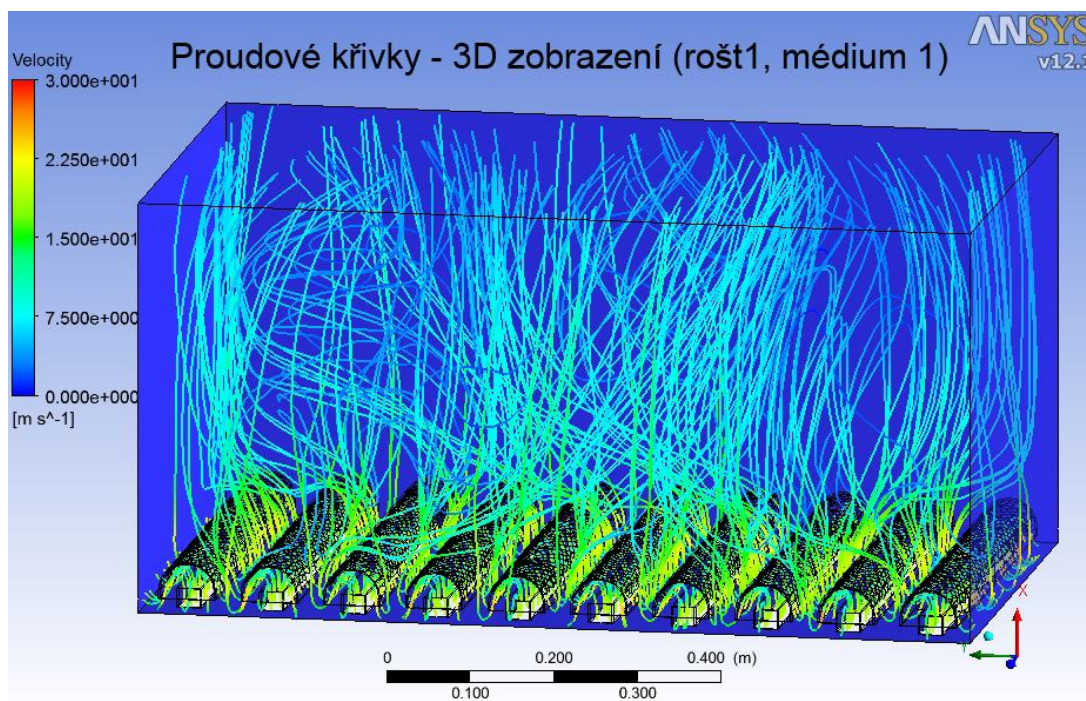
Cílem této části diplomové práce bylo popsat chování média zejména v klidových oblastech a také místech, kde dochází ke styku média s povrchem roštu.

Z důvodu vysoké výpočtové náročnosti na výkon počítače musel být model co nejvíce zjednodušen. Nemohl být ovšem zjednodušen tak, aby došlo k ovlivnění výsledků. Z toho důvodu byla zvolena výška fluidní komory nad roštěm 0,5 m.

Tato výška je již dostatečná vzhledem k tomu, že médium již není rozvířeno a vektor výstupní rychlosti je ve všech místech téměř rovnoběžný se stěnami fluidní komory. Nedochozí tedy již k ovlivnění výpočtu díky minimalizaci proudového modelu.

Prvním médiem je vzduch o průtoku $Q_V = 157,6 \text{ m}^3/\text{min}$.

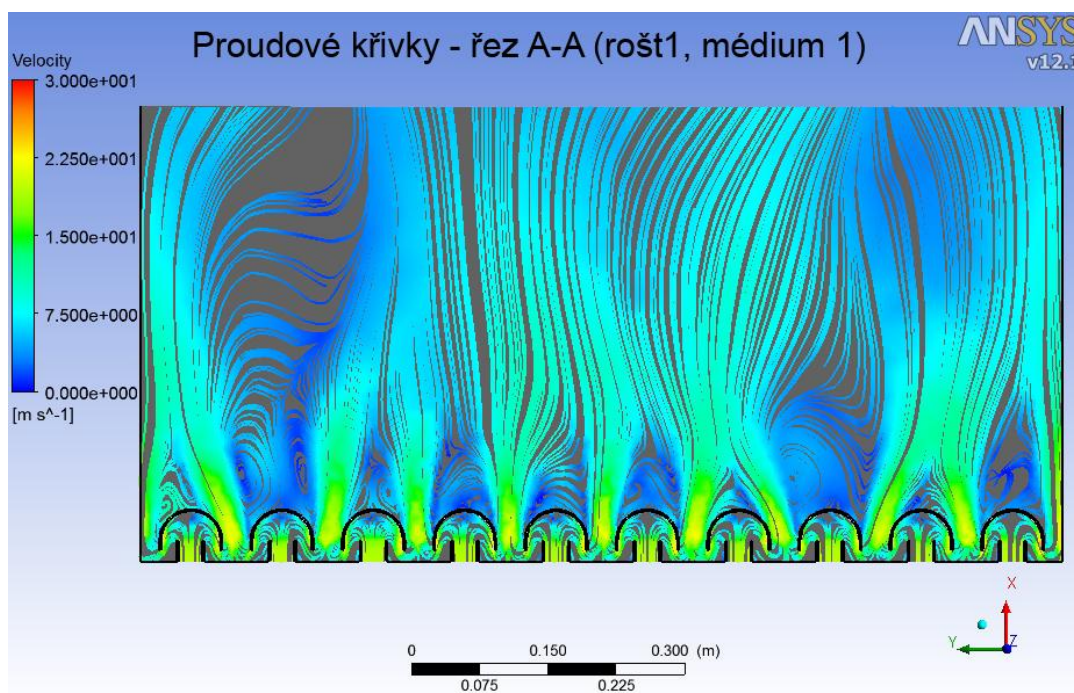
4.8. První rošt



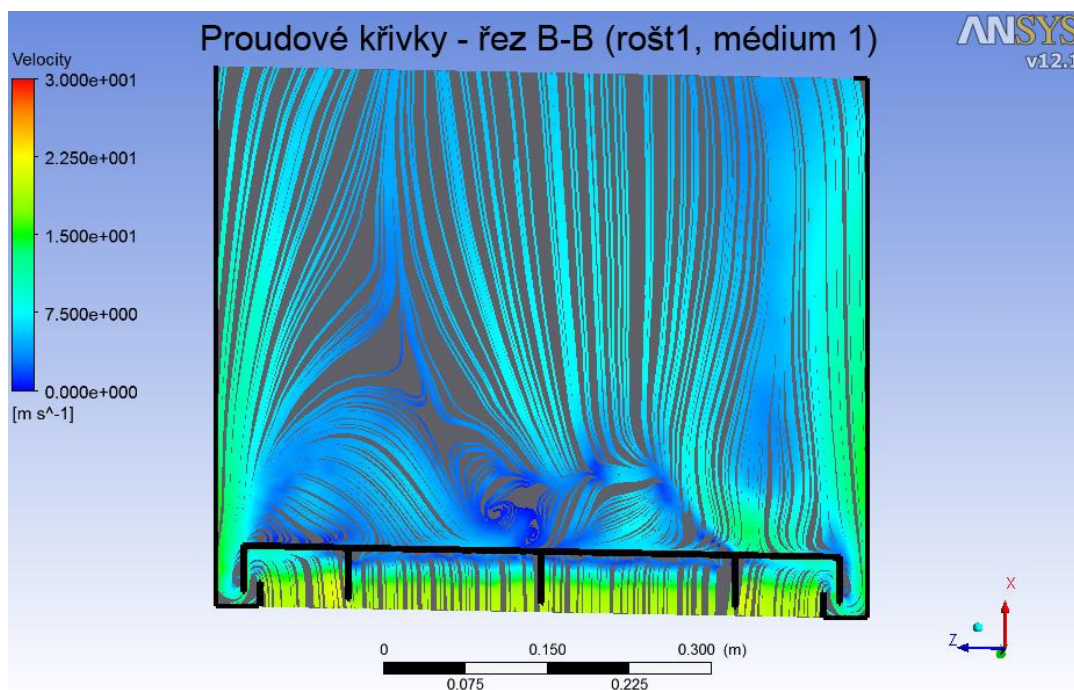
Obr. 9: Proudové křivky 3D zobrazení (rošt1, médium1)

Podrobíme-li obrázek se 3D zobrazením (obr. 9) bližšímu zkoumání, zjistíme, že rychlost proudění je nejvyšší v oblasti vstupu proudícího média do roštu, tato rychlost

se pohybuje okolo 23 m/s a směrem výstupu její hodnota klesá. Na výstupu se rychlost média pohybuje kolem 4 m/s.



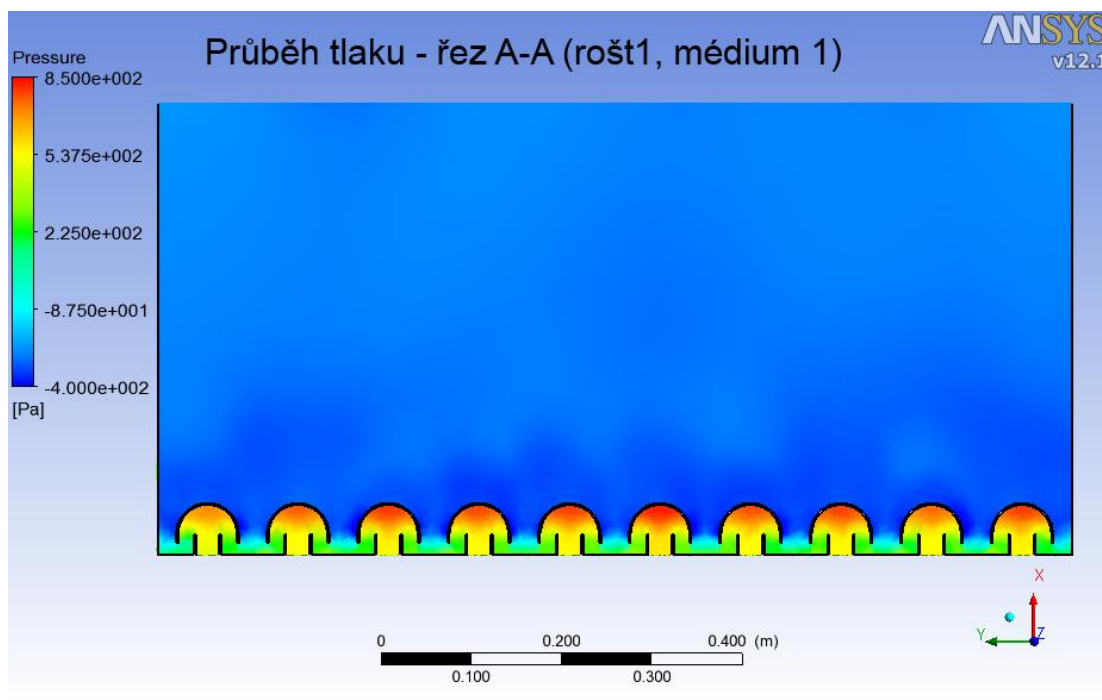
Obr. 10: Proudové křivky – řez A-A (rošt1, médium1)



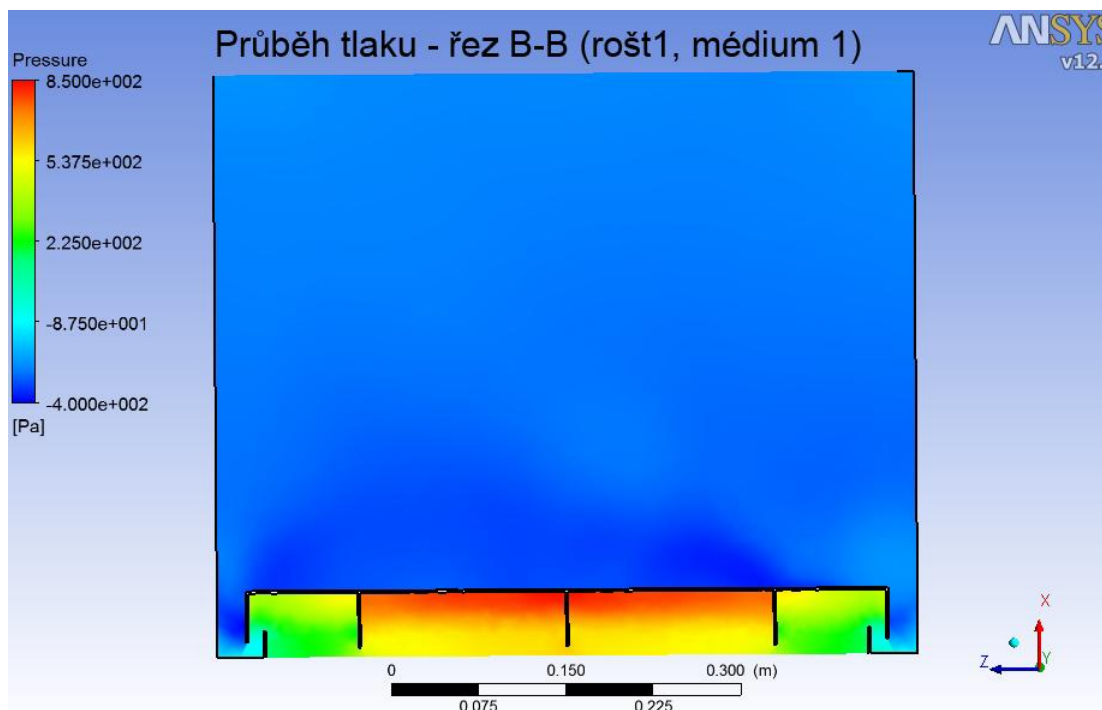
Obr. 11: Proudové křivky – řez B-B (rošt1, médium1)

Z obrázků 10 a 11 můžeme pozorovat proudnice a jejich tvar. Médium vstupuje do roštu vysokou rychlostí. V horní části klobouku dochází k jejímu snížení. Jakmile

se dostane médium pryč z klobouku, dochází opět k intenzivnímu zvýšení rychlosti. Toto intenzivní zvýšení rychlosti v oblasti mezi klobouky je zřetelné na obr. 10. Díky vysoké rychlosti v této oblasti dochází k vytváření vírů v oblasti nad „klobouky“.



Obr. 12: Průběh tlaku – řez A-A (rošt1, médium1)

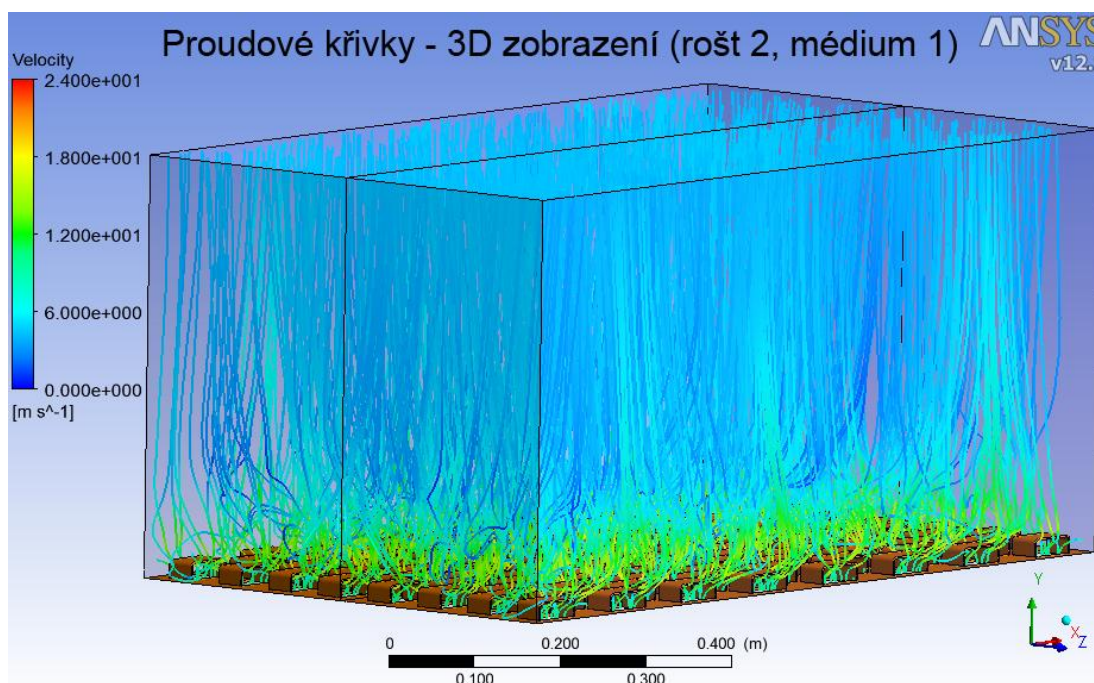


Obr. 13: Průběh tlaku – řez B-B (rošt1, médium1)

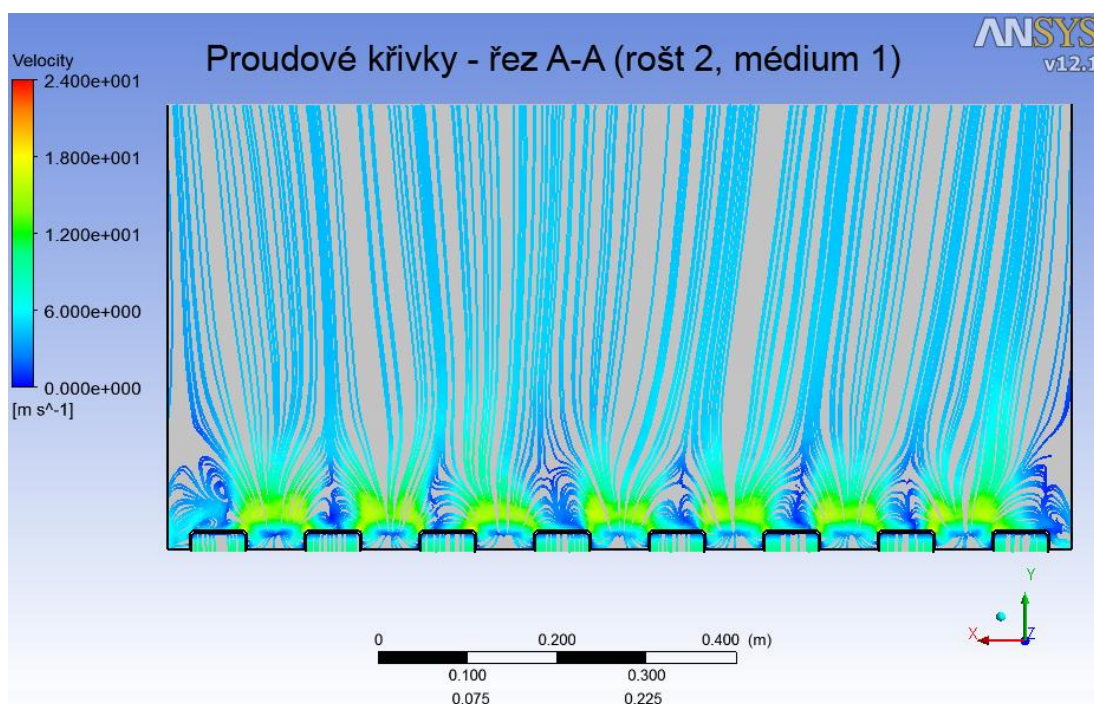
Z průběhu tlaku lze pozorovat, že nejvyšší tlak na rošt působí v oblasti horní části klobouku, kde médium působí tlakem 850 Pa na horní část klobouku. Z obr. 13 je

patrné, že největší silové působení je ve střední části klobouku. V krajních částech, které jsou přesazeny, je tlakové působení rovno jen jedné čtvrtině nejvyššího tlaku.

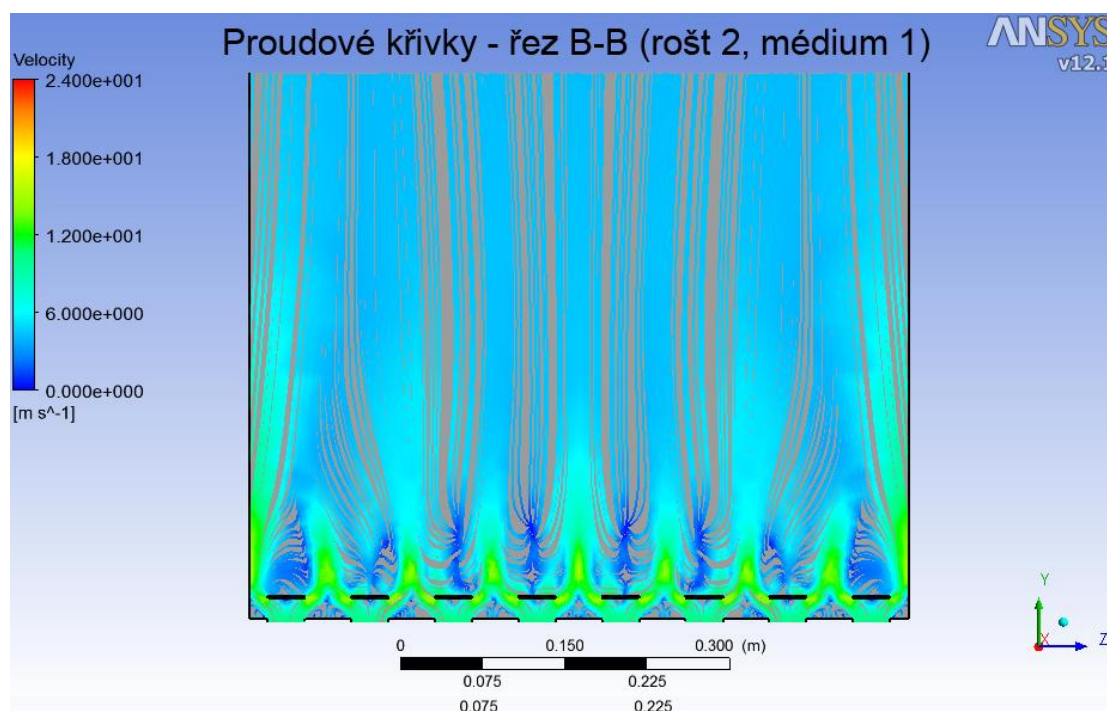
4.9. Druhý rošt



Obr. 14: Proudové křivky na druhém roštu – 3D pohled (rošt2, médium1)

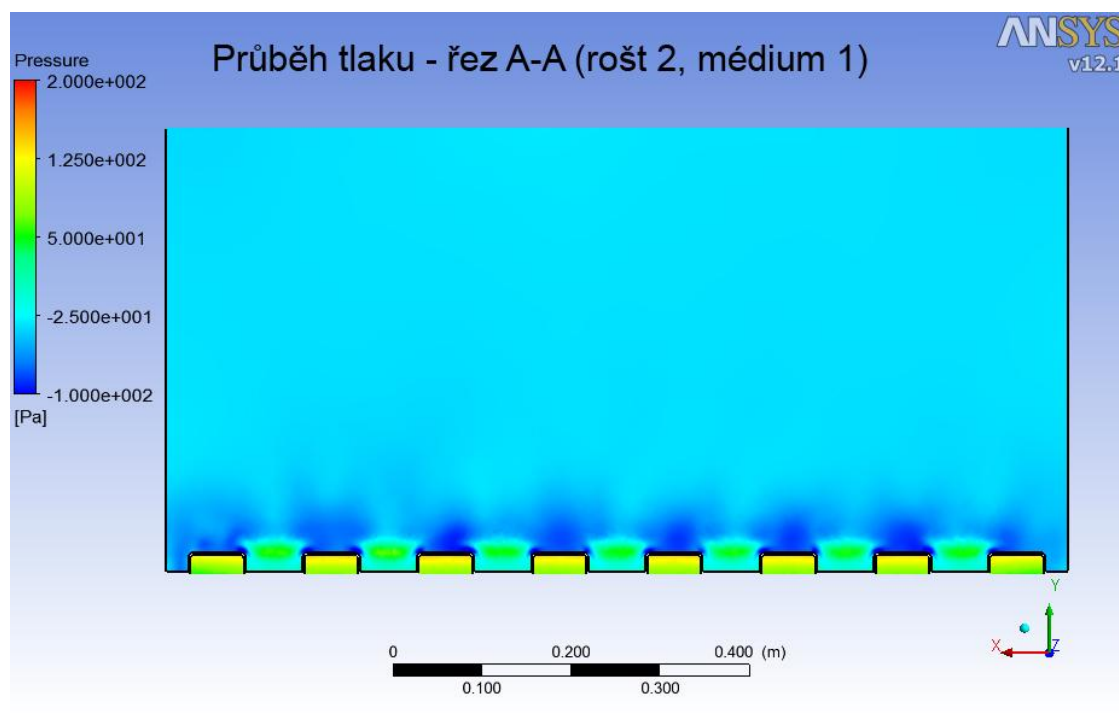


Obr. 15: Proudové křivky na druhém roštu - řez A-A (rošt2, médium1)

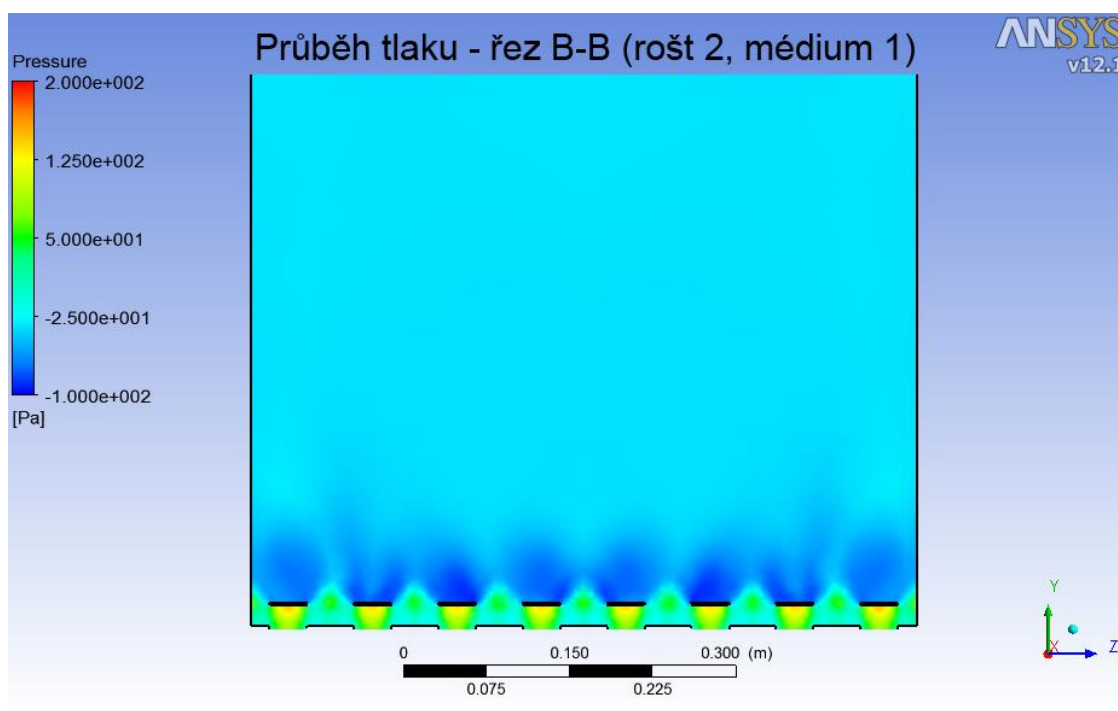


Obr. 16: Proudové křivky na druhém roštu - řez B-B (rošt2, médium1)

Z průběhu rychlosti na druhém roštu můžeme pozorovat obdobné chování jako u prvního roštu. V oblasti, kde médium opouští vložené segmenty, dochází ke zvýšení rychlosti. V oblasti nad segmenty dochází k tvorbě vírů. Tyto víry jsou intenzivnější než v případě prvního roštu. Z tvaru proudnic (obr. 16) můžeme odhadnout, že médium v oblasti nad segmenty postupuje přímo nahoru, nedochází tedy k tak intenzivnímu mísení v horní části jako v případě roštu jedna.

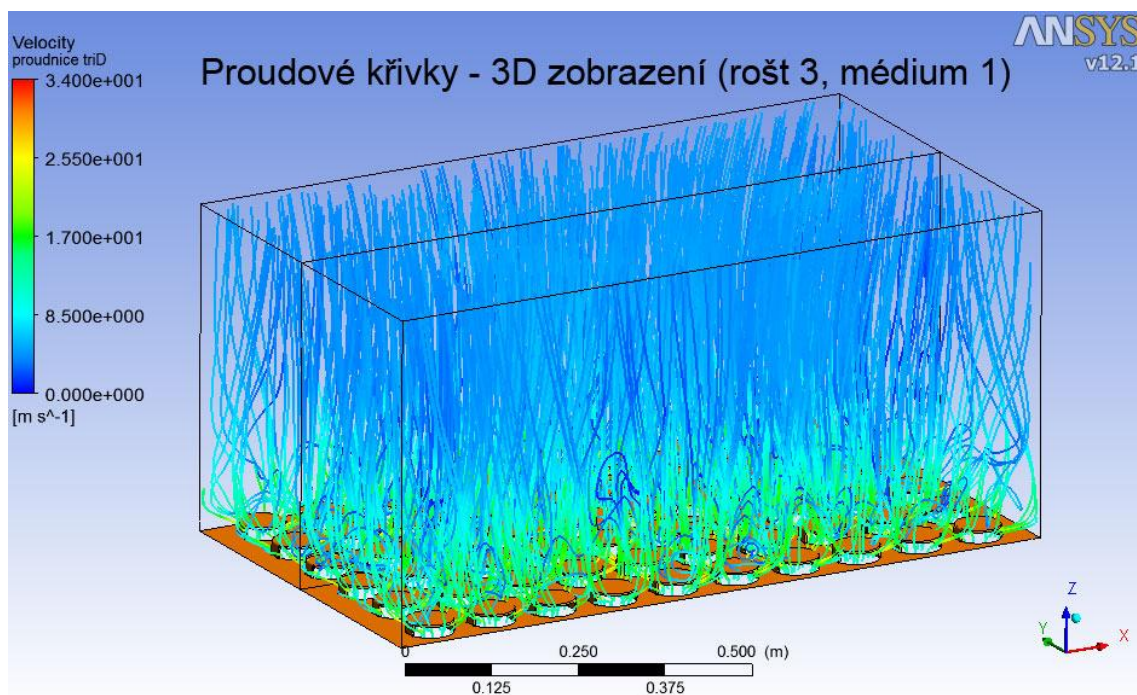


Obr. 17: Průběh tlaku na druhém roštu – řez A-A (rošt2, médium1)



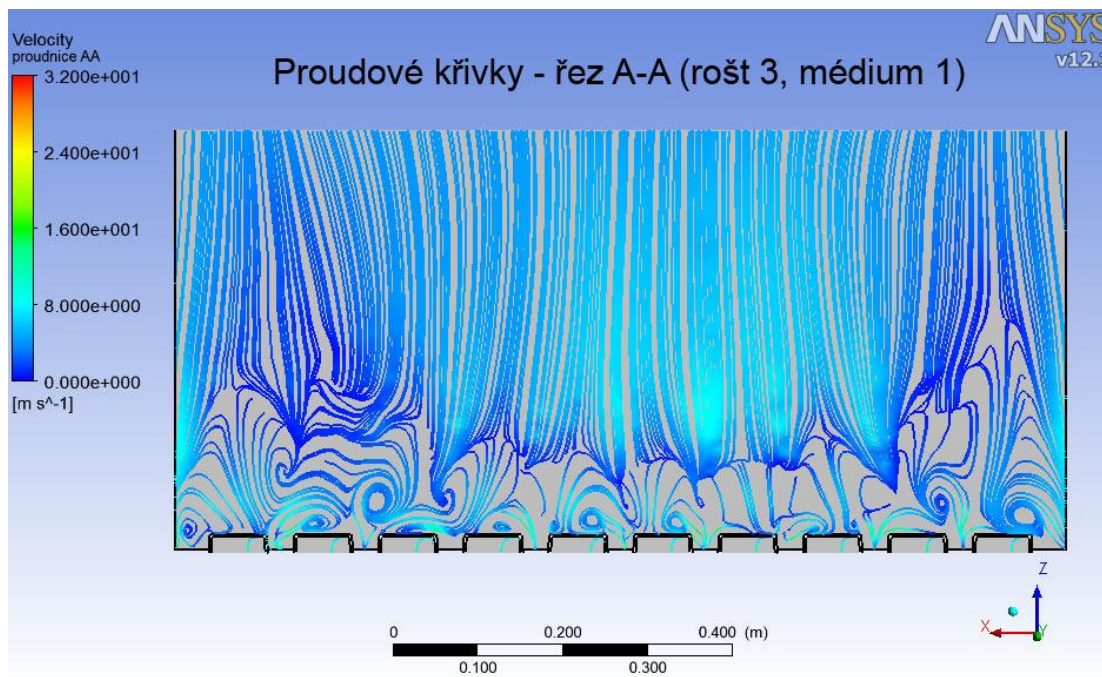
Obr. 18: Průběh tlaku na druhém roštu – řez B-B (rošt2, médium1)

4.10. Třetí rošt

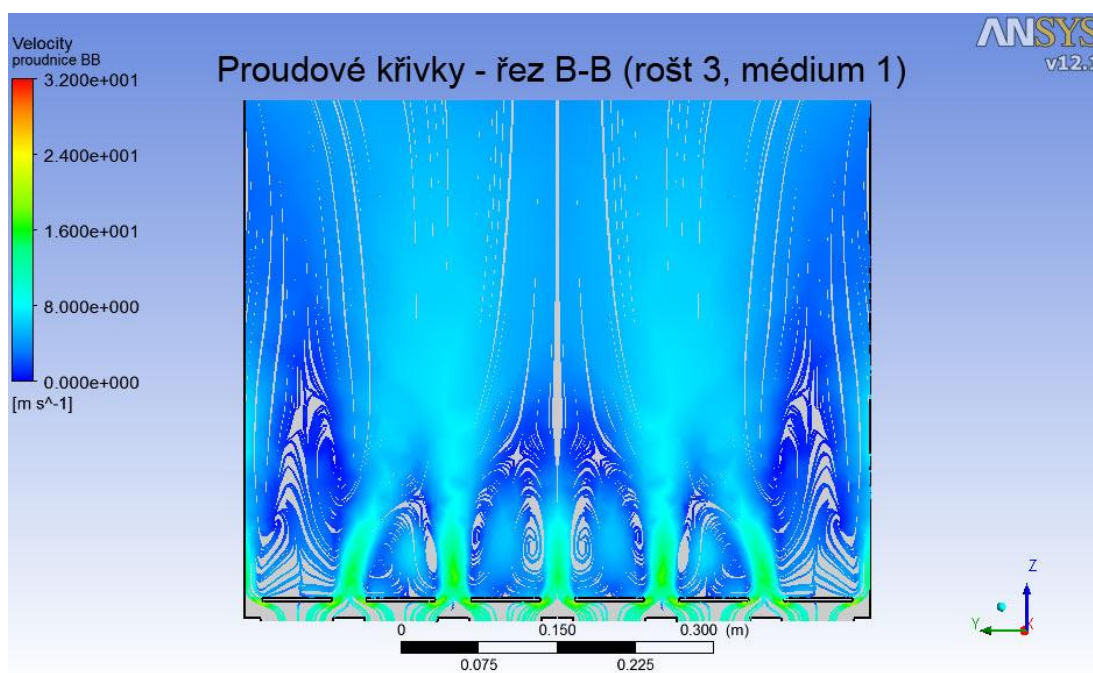


Obr. 19: Proudové křivky na třetím roštu – 3D pohled (rošt3, médium1)

Na obrázcích třetího roštu je patrné, že ve fluidní komoře dochází k tvorbě vírů až do střední části její výšky, což vede k intenzivní výměně tepla. Na obr. 20 můžeme pozorovat, že víry, které jsou v blízkosti stěn komory, jsou nejvyšší. Směrem ke středu dochází k jejich snižování. Tato skutečnost je způsobena tím, že médium, které proudí ven z roštu přímo po stěně komory, není ovlivněno proudem z jiného segmentu, jako je tomu u v případě proudů ve středu nádoby. A to je důvod, proč výška vírů směrem od stěn ke středu klesá.

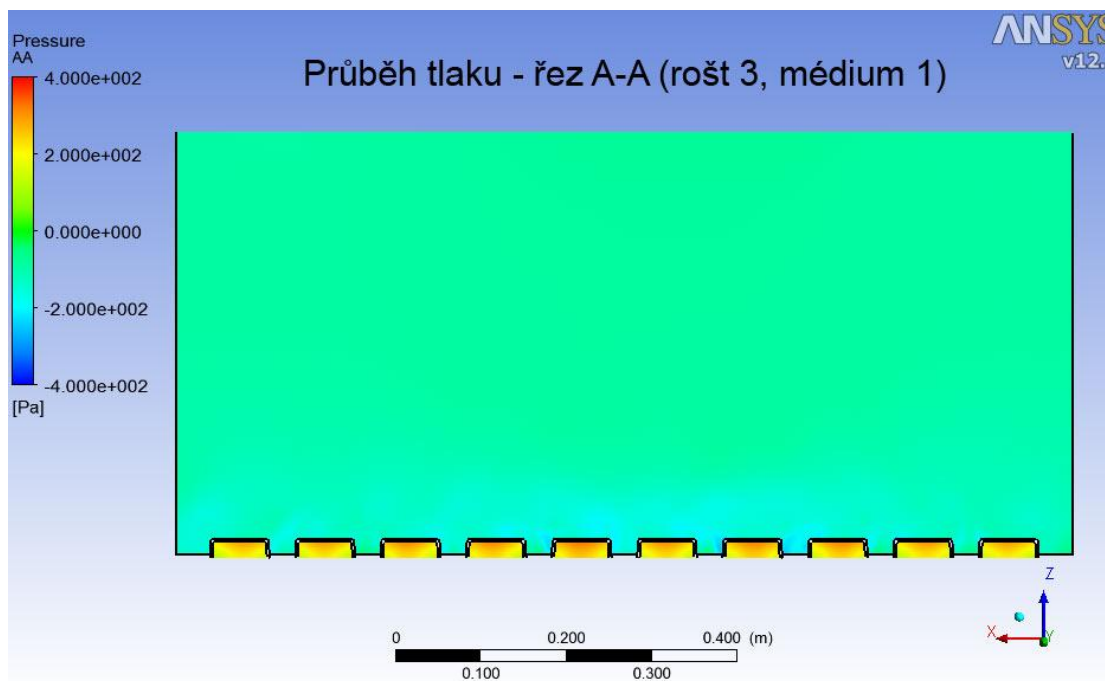


Obr. 20: Proudové křivky na třetím roštu – řez A-A (rošt3, médium1)

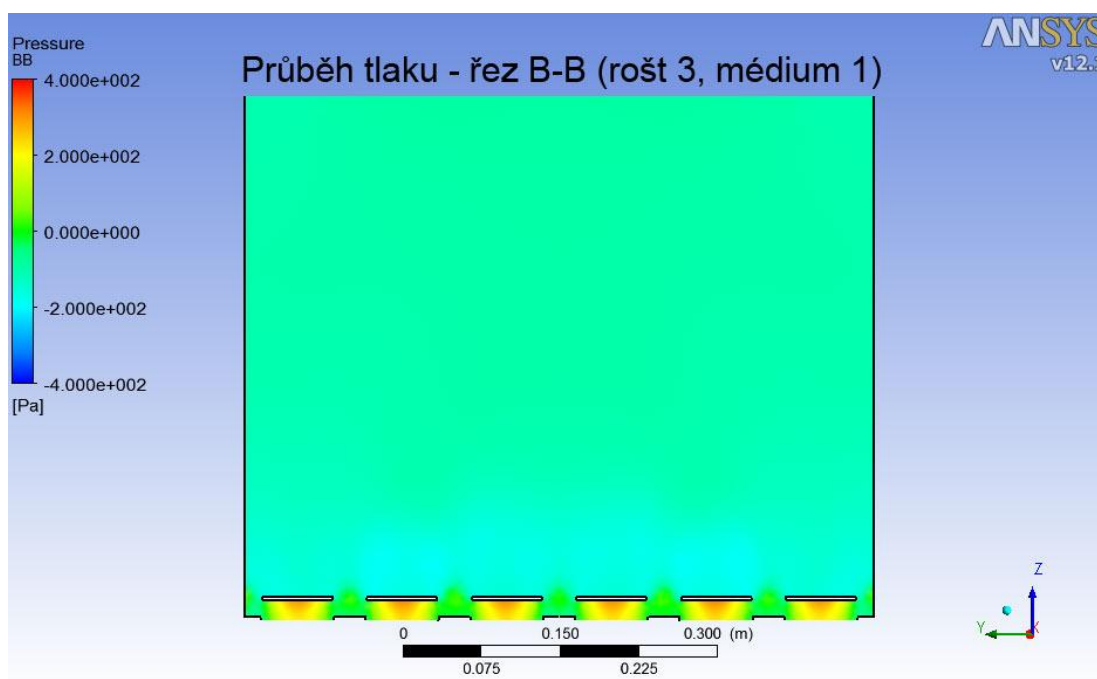


Obr. 21: Proudové křivky na třetím roštu – řez B-B (rošt3, médium1)

V případě třetího roštu je tlakové působení na horní stranu segmentu výrazně nižší, než v případě prvního roštu. Tato skutečnost je způsobena větší plochou segmentů oproti prvnímu roštu. Velikost tlaku, který působí na horní část segmentů, by měla být kontrolována, aby nedošlo k deformaci segmentů a následnému ohrožení funkce, v krajních případech by mohlo dojít k přetržení segmentů. V daném případě by však k deformaci segmentů nemělo dojít.



Obr. 22: Průběh tlaku na třetím roštu – řez A-A (rošt3, médium1)



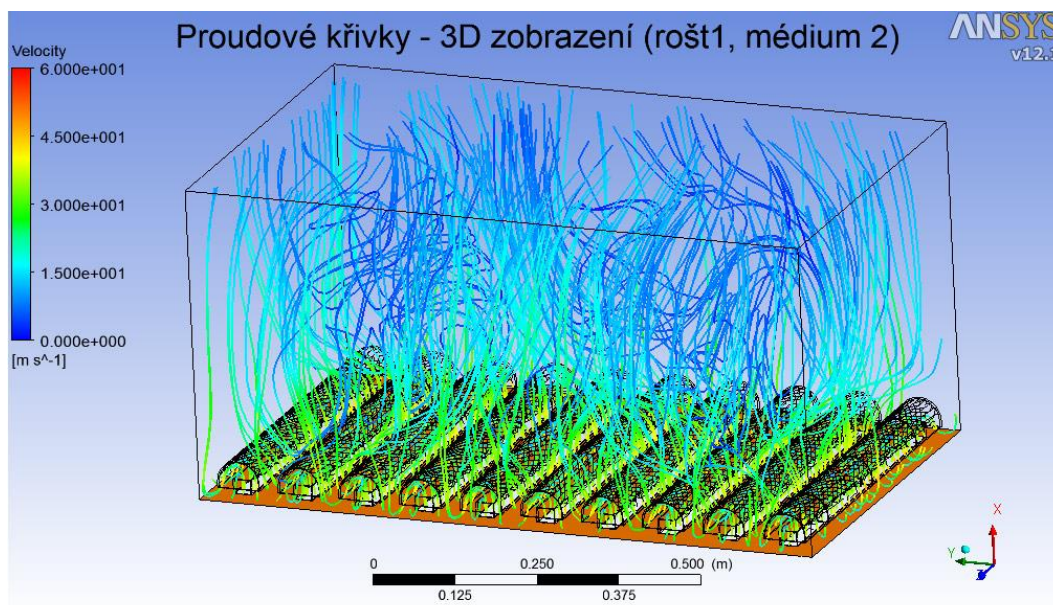
Obr. 23: Průběh tlaku na třetím roštu – řez B-B (rošt3, médium1)

5. Proudové křivky pro médium 2 (vodní pára)

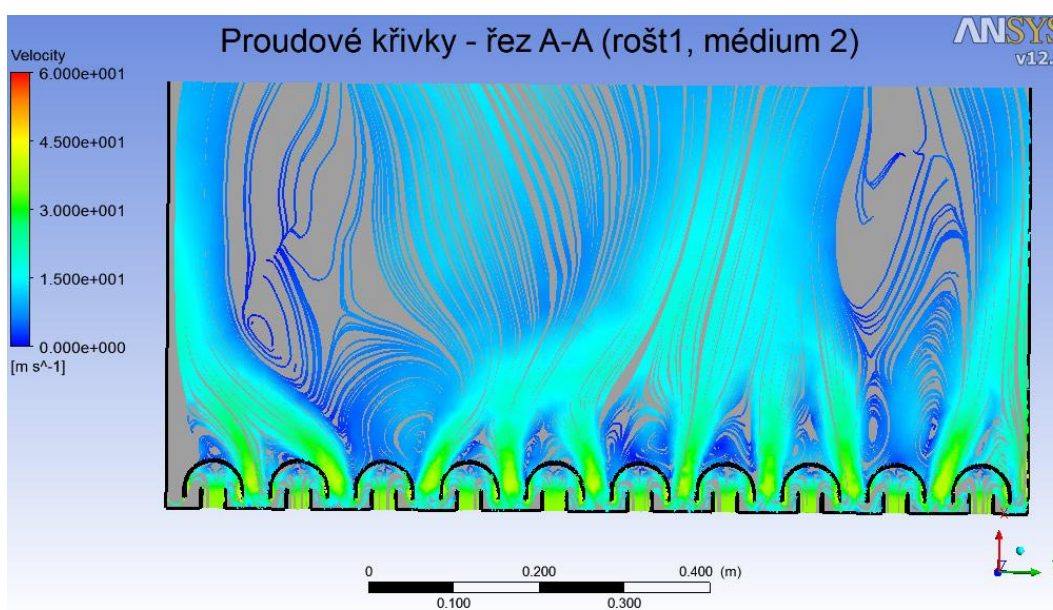
V případě druhého média se proudové křivky a průběhy tlaku nijak výrazně neliší od průběhů prvního média. Jen v důsledku vyššího průtoku dochází ke změně rychlostí a tlakového působení na jednotlivé prvky roštů.

Druhým médiem je mírně přehřátá pára o průtoku $Q_p=289 \text{ m}^3/\text{min}$

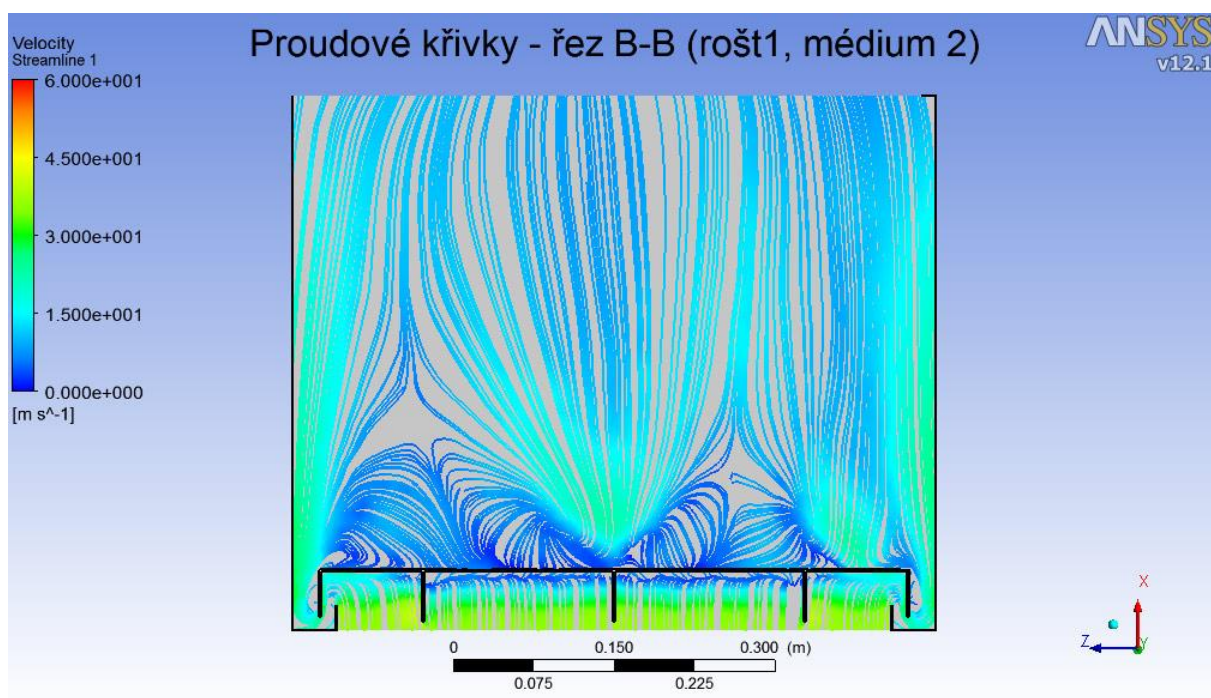
5.1. První rošt pro vodní páru



Obr. 24: Proudové křivky na prvním roštu – 3D pohled (rošt 1, médium 2)

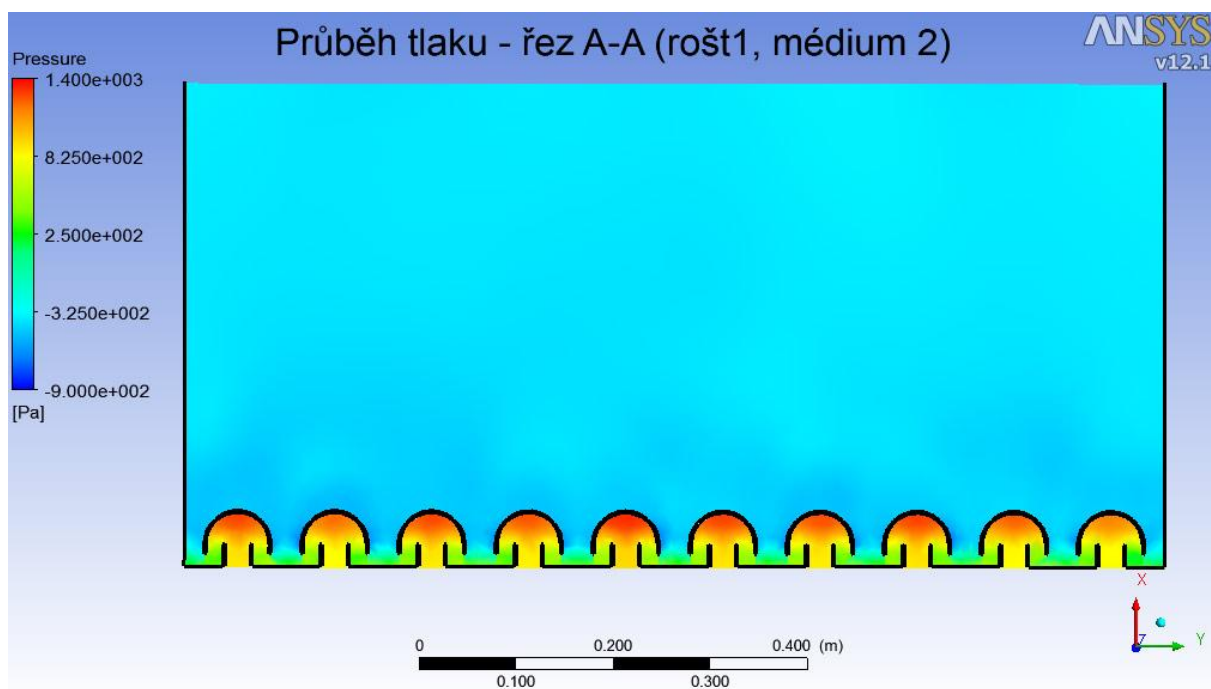


Obr. 25: Proudové křivky na prvním roštu – řez A-A (rošt 1, médium 2)

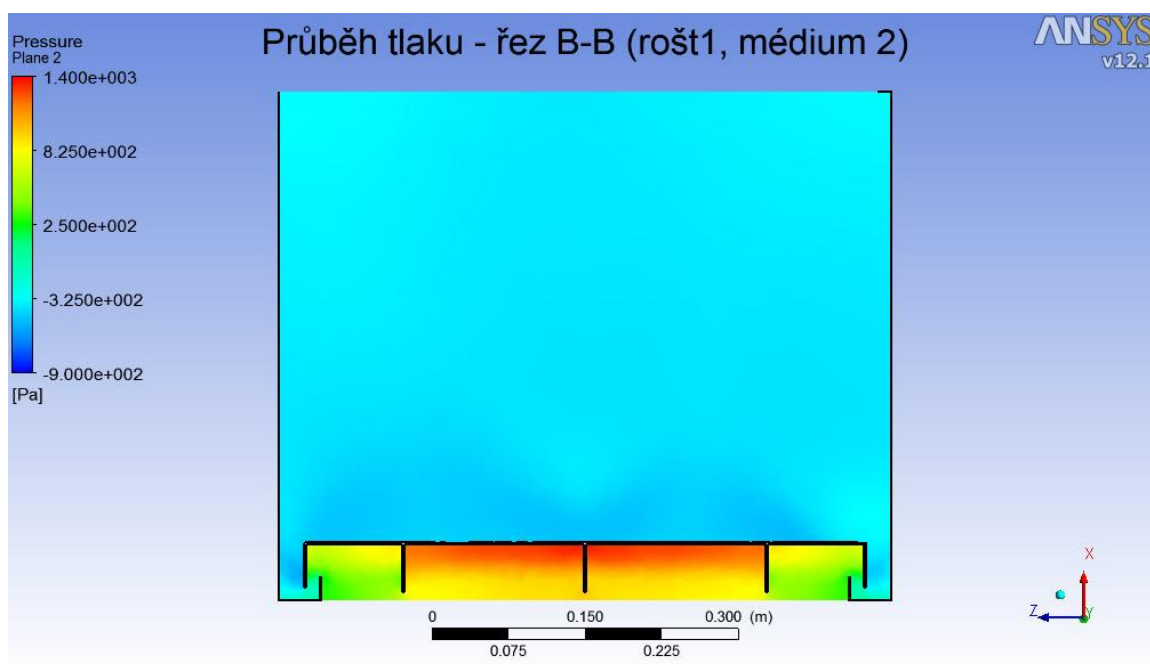


Obr. 26: Proudové křivky na prvním roštu – řez B-B (rošt 1, médium 2)

Druhé médium proudí výrazně rychleji než první. Rychlost mezi klobouky se zvýšila z původních 23 m/s na 52 m/s, což je více než dvojnásobek. Porovnáme-li obr. 10 s obr. 26, dojdeme k závěru, že tvary proudnic se liší jen minimálně.



Obr. 27: Průběh tlaku na prvním roštu – řez A-A (rošt 1, médium 2)

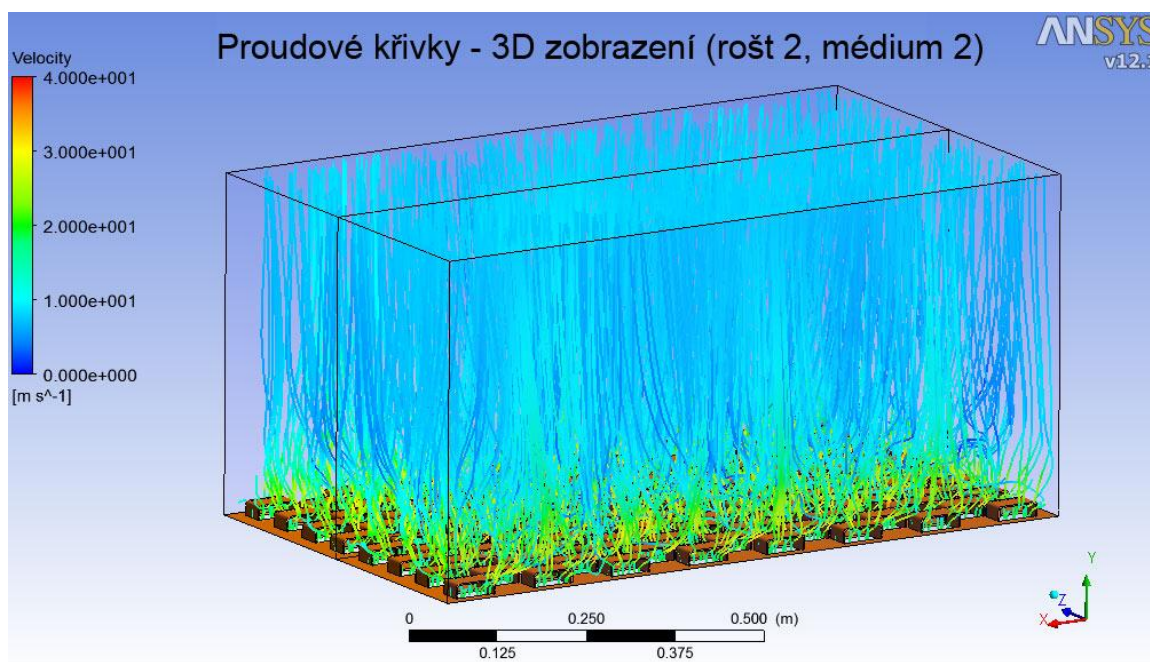


Obr. 28: Průběh tlaku na prvním roštu – řez B-B (rošt 1, médium 2)

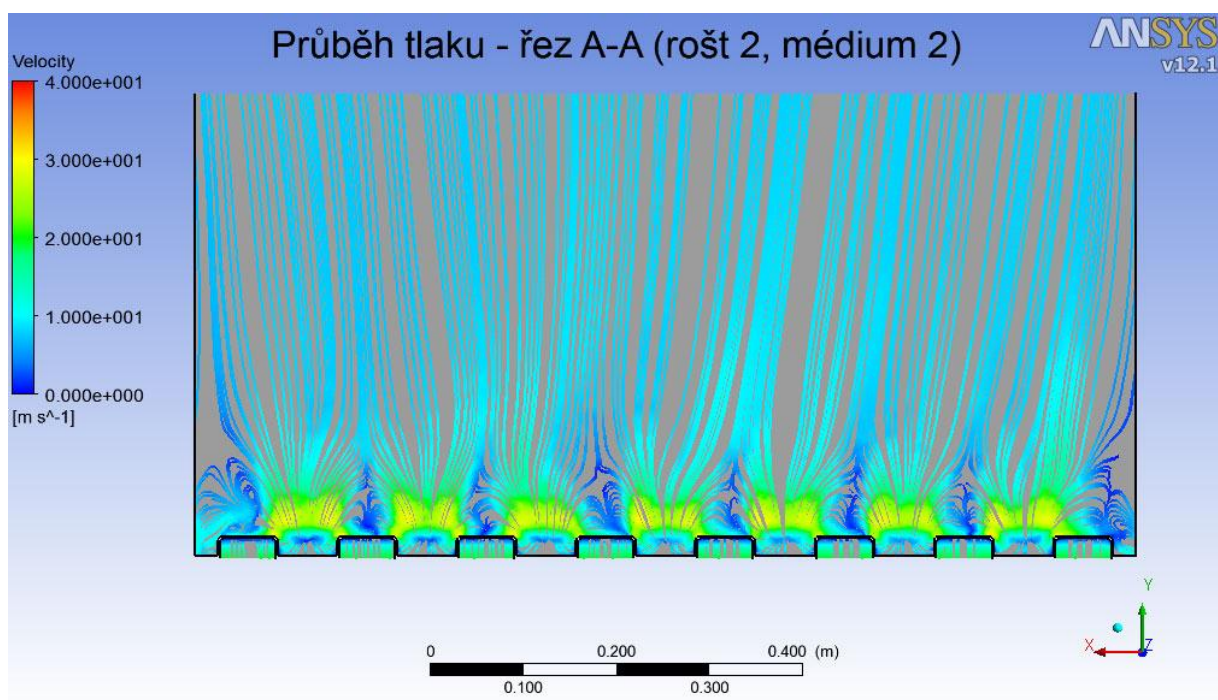
Tlakové působení v horní části klobouku se zvýšilo z původních 850 Pa na 1400 Pa.

5.2. Druhý rošt pro vodní páru

Rychlost média v případě druhého roštu se zvýšila z původních 19 m/s na 38 m/s. Což je v dvojnásobek původní hodnoty.

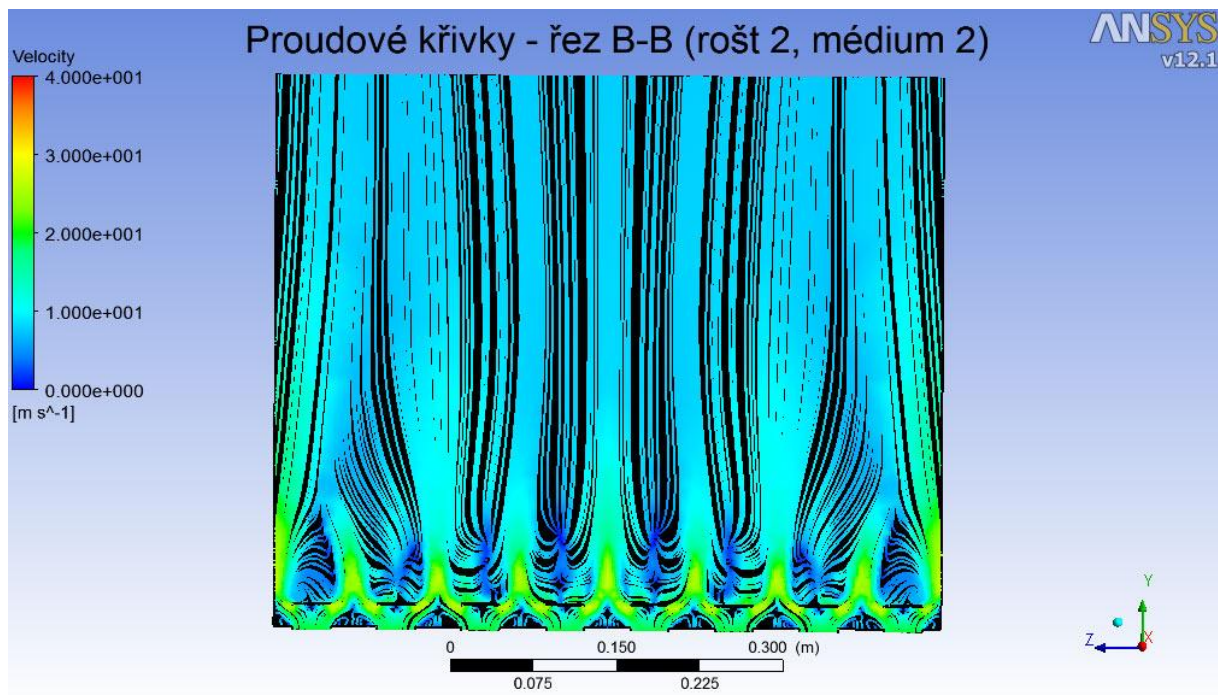


Obr. 29: Proudové křivky na druhém roštu – 3D pohled (rošt 2, médium 2)



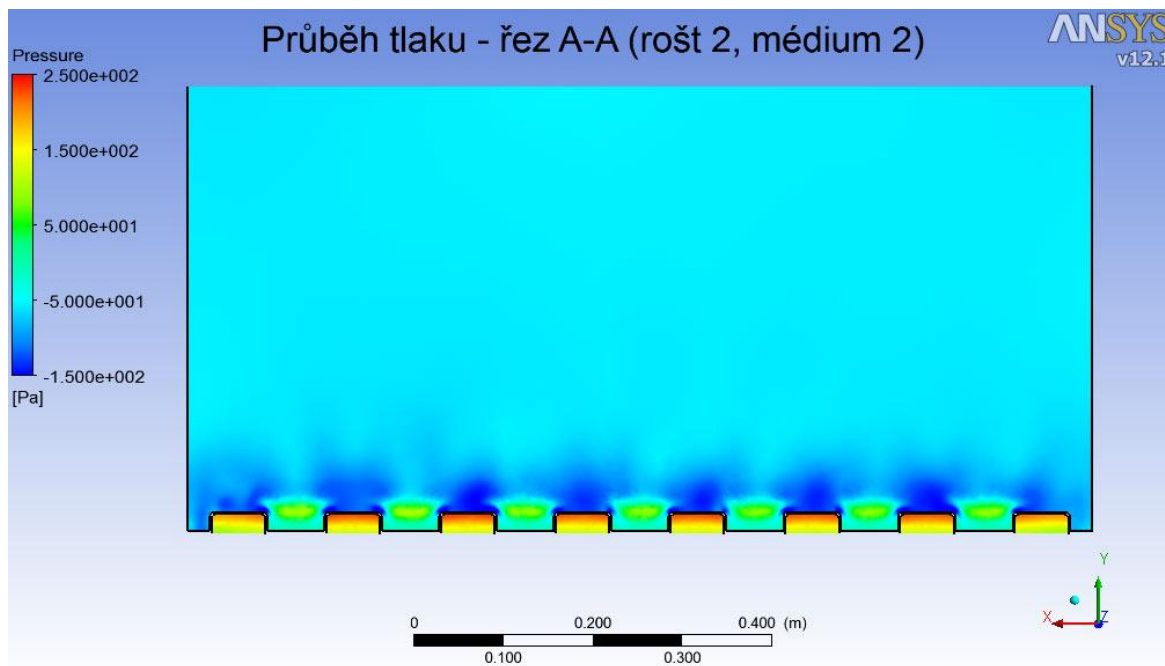
Obr. 30: Proudové křivky na druhém roštu – řez A-A (rošt 2, médium 2)

Podrobíme-li obr. 30 bližšímu zkoumání, můžeme dojít k závěru, že velikost a zejména poloha segmentů vůči sobě není ideální. Proudové křivky jsou jen minimálně ovlivněny navzájem. Tato skutečnost byla také zjištěna na obr. 15, případně i obr. 31, kde se skutečnost projevuje přímými proudnicemi od okraje segmentu po horní víko fluidní komory.

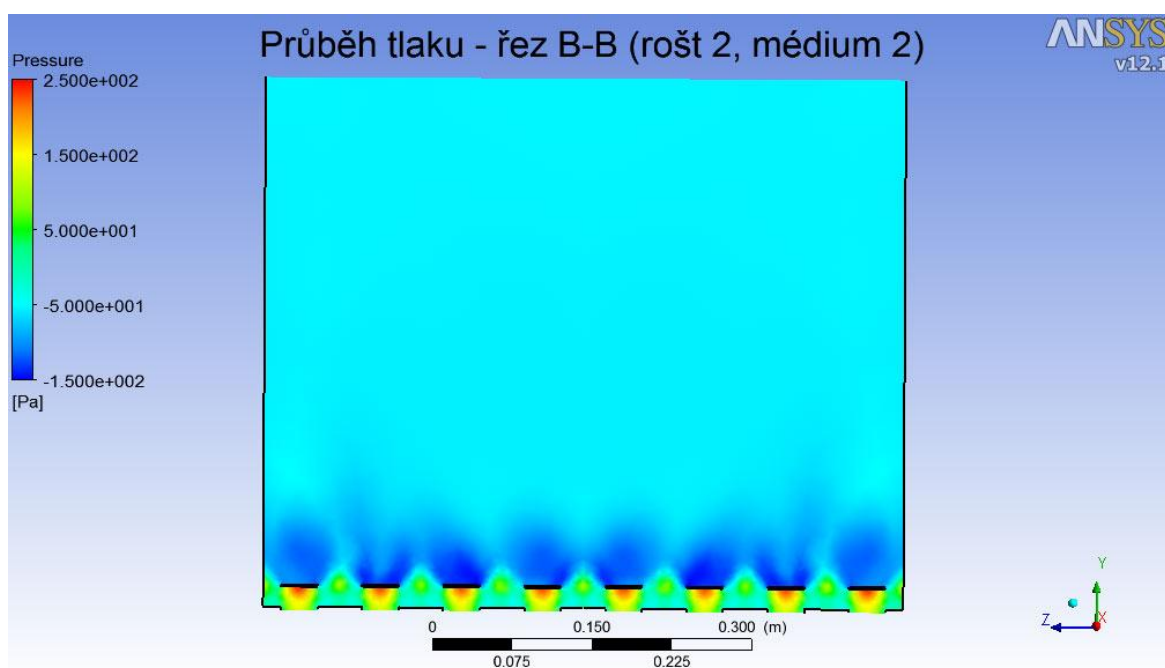


Obr. 31: Proudové křivky na druhém roštu – řez B-A (rošt 2, médium 2)

Vzájemnou neovlivněnost proudů můžeme odvodit z obr. 30 díky tvaru a pozici vírů. Víry v případě druhého roštu jsou všechny ve stejné výšce, z čehož je patrné, že nejsou navzájem příliš ovlivněny. V případě, že by byly navzájem ovlivněny, bylo by z obrázků patrné, že směrem od stěny komory ke středu dochází k poklesu pozice víru, jak je tomu u prvního a třetího roštu (viz obr. 25, obr. 35). Tato skutečnost může mít vliv na velikost přestupu tepla, a proto by bylo vhodnější vybrat rošt, ve kterém dochází intenzivnějšímu mísení.



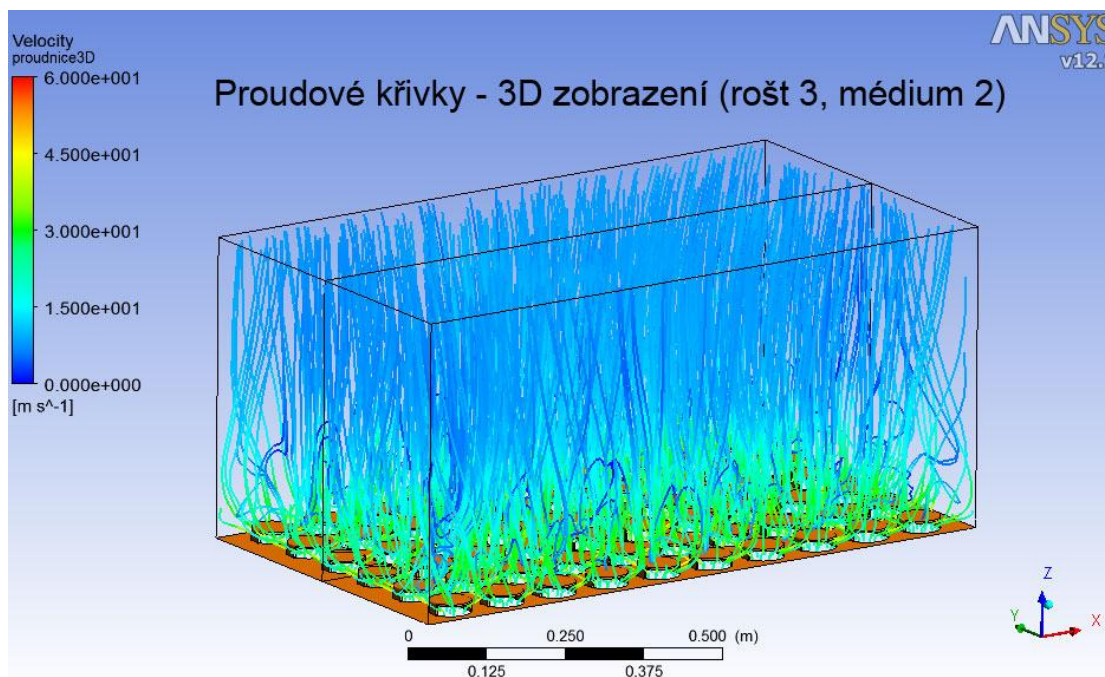
Obr. 32: Průběh tlaku na druhém roštu – řez A-A (rošt 2, médium 2)



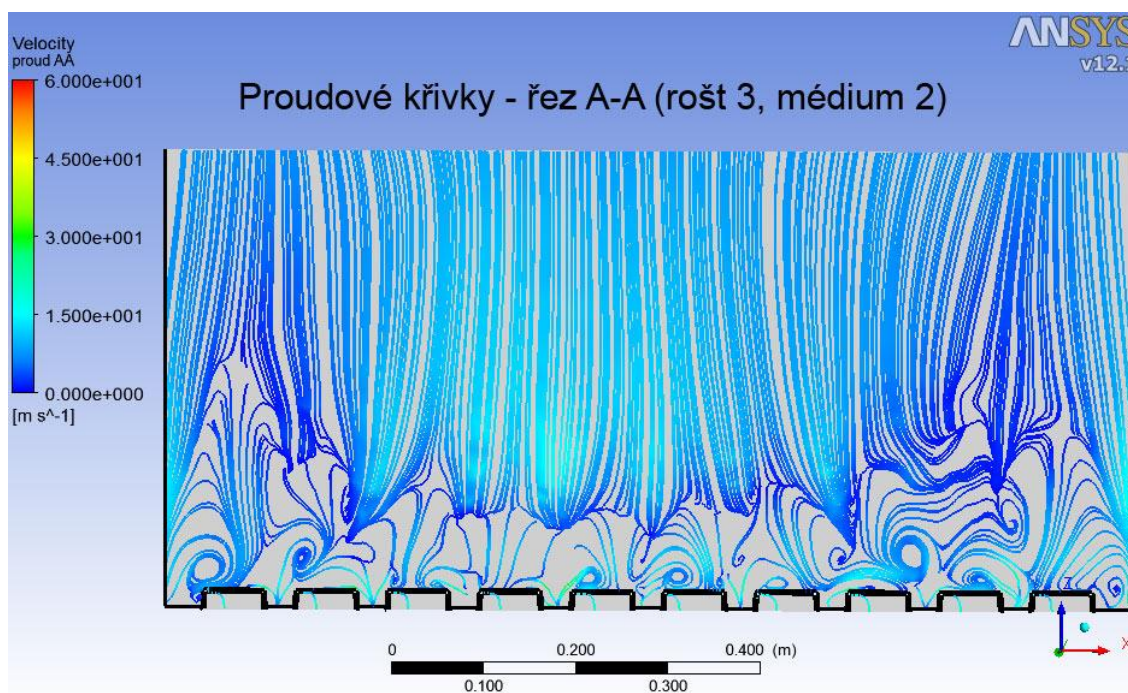
Obr. 33: Průběh tlaku na druhém roštu – řez B-B (rošt 2, médium 2)

Na průběhu tlaku z druhého roštu (obr. 32, obr. 33) je velice dobře patrné, že v oblasti, kde dochází k tvorbě vírů (viz obr. 31), se tvoří podtlak. V daném případě podtlak dosahuje hodnoty až 150 Pa.

5.3. Třetí rošt pro vodní páru

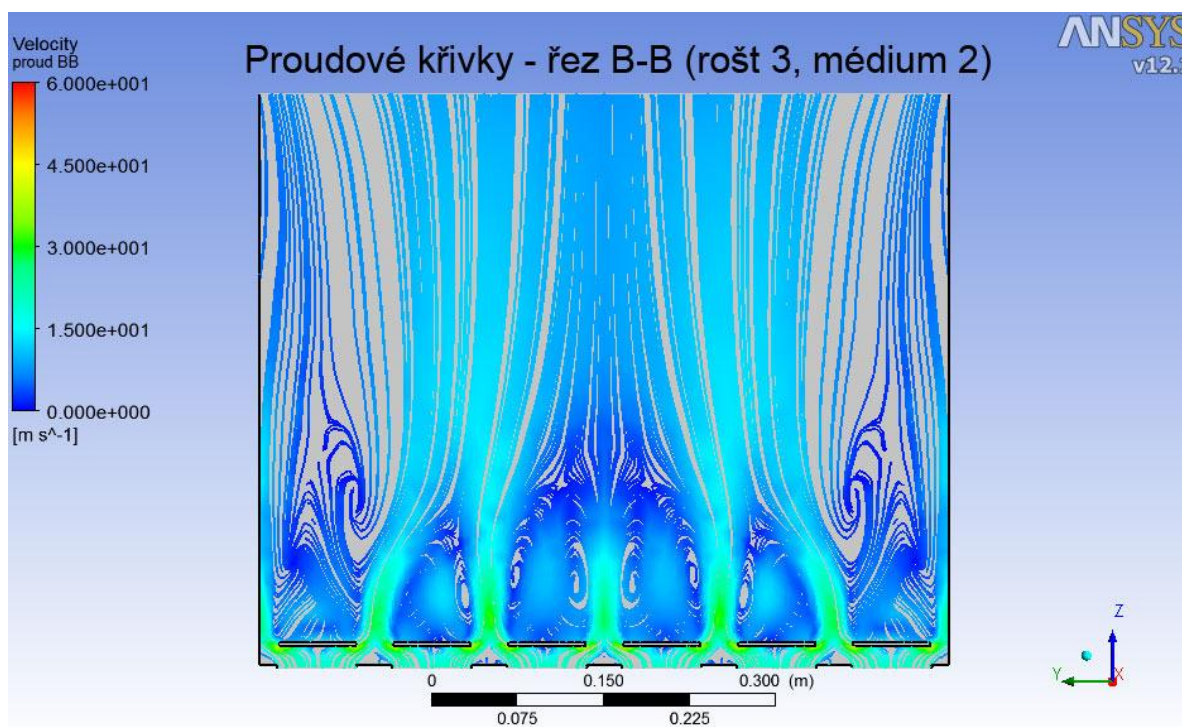


Obr. 34: Proudové křivky na třetím roštu – 3D pohled (rošt 3, médium 2)

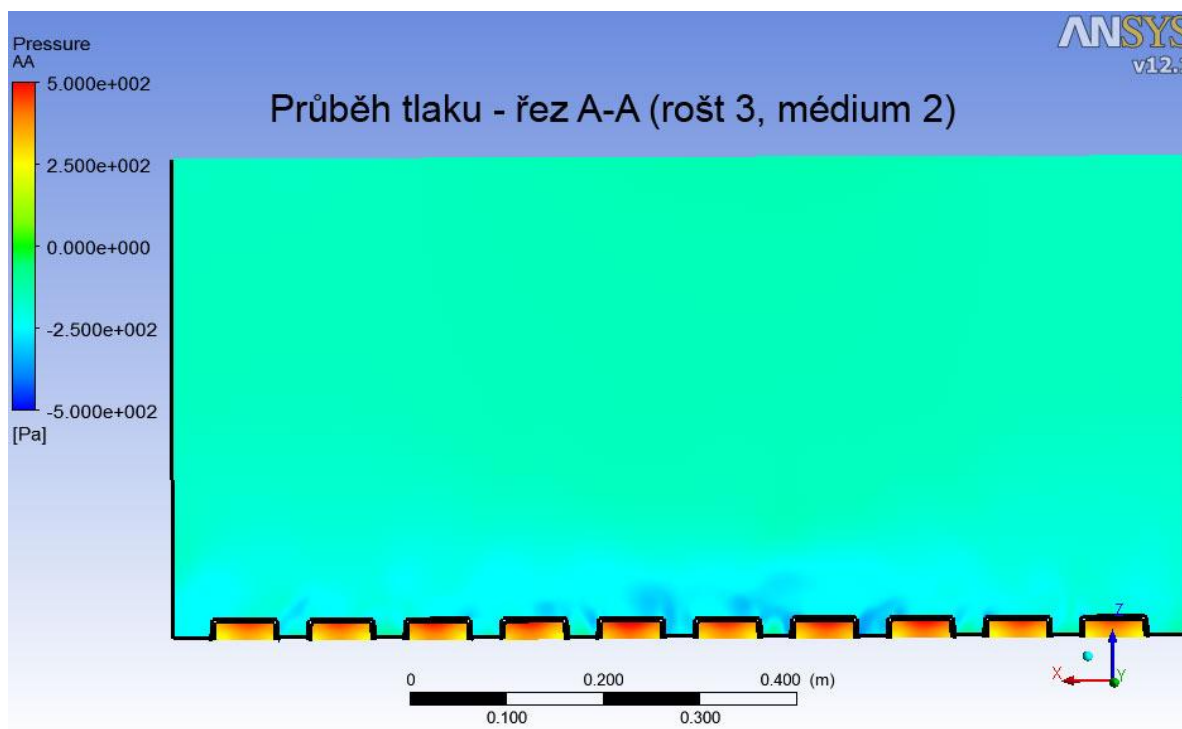


Obr. 35: Proudové křivky - řez A-A (rošt 3, médium 2)

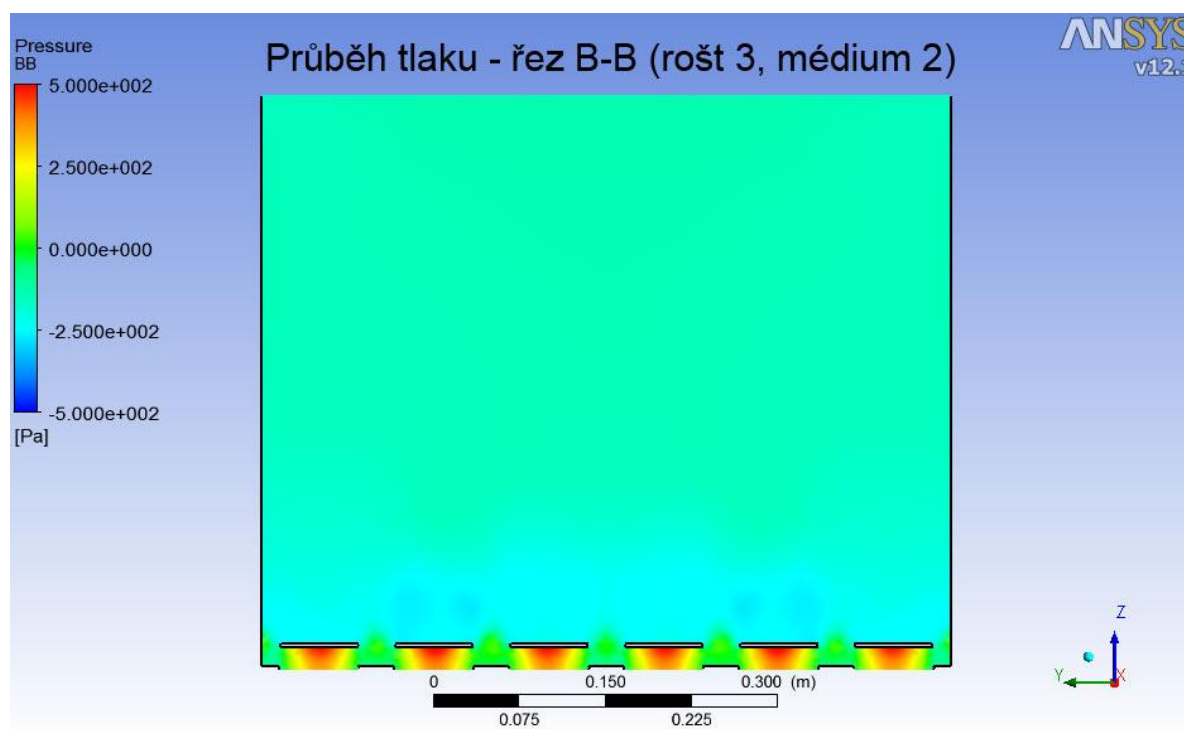
Na obrázcích 36, 37 je velice dobře viditelná vzájemná ovlivněnost proudů, která se vyznačuje poklesem vírů směrem ke středu. Stejnou skutečnost však můžeme sledovat i v případě průběhu tlaku (obr. 36, obr. 37), kde se tato skutečnost objevuje opačným způsobem. Podtlak směrem ke stěně snižuje svoji hodnotu.



Obr. 36: Proudové křivky - řez A-A (rošt 3, médium 2)



Obr. 37: Průběh tlaku - řez A-A (rošt 3, médium 2)



Obr. 38: Průběh tlaku - řez B-B (rošt 3, médium 2)

6. Porovnání tlakové ztráty jednotlivých roštů s intervalovými hodnotami

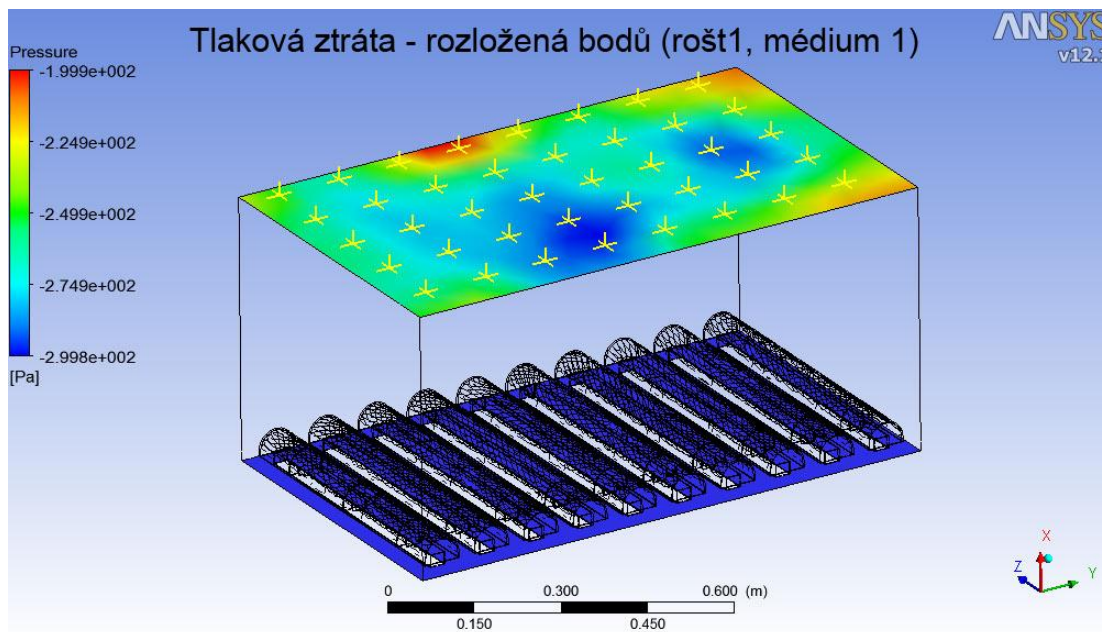
Určení tlakové ztráty a porovnání s intervalovými hodnotami je klíčové kritérium ke správné volbě roštu. Pomocí programu CFX bylo vymodelováno kromě proudových a tlakových křivek také rozložení tlaku na výstupu. Rozložení tlaku nebylo v celé ploše konstantní, a proto bylo zvoleno několik bodů, v nichž byly určeny přesné hodnoty tlakové ztráty. Z hodnot v těchto bodech se vypočetla průměrná hodnota tlakové ztráty na výstupu.

Poměr mezi tlakovou ztrátou na výstupu a tlakovou ztrátou roštu musí být porovnán s intervalovou hodnotou. Pokud námi vypočtený tlakový poměr leží v intervalu hodnot, lze fluidní rošt pro daný účel bez obav použít. Nevyhovuje-li poměr tlakových ztrát danému intervalu, je rošt pro daný účel nevhodný. V daném roštu se fluidní vrstva vůbec nevytvoří, nebo není zaručeno její vytvoření. V daných případech je použití roštu nevhodné, protože nesplňuje základní kritéria pro funkčnost zařízení.

6.1. Tlaková ztráta na prvním roštu (médium 1)

Tlaková ztráta na prvním roštu byla odečtena v náhodně vybraných 40 bodech, čímž bylo dosaženo dostatečného počtu hodnot. Vzhledem k vysokému počtu hodnot by měla být dostatečně eliminována odchylka vlivem nepřesnosti. Jednotlivá místa, ve kterých bylo provedeno měření, jsou znázorněna na obrázku (obr. 39).

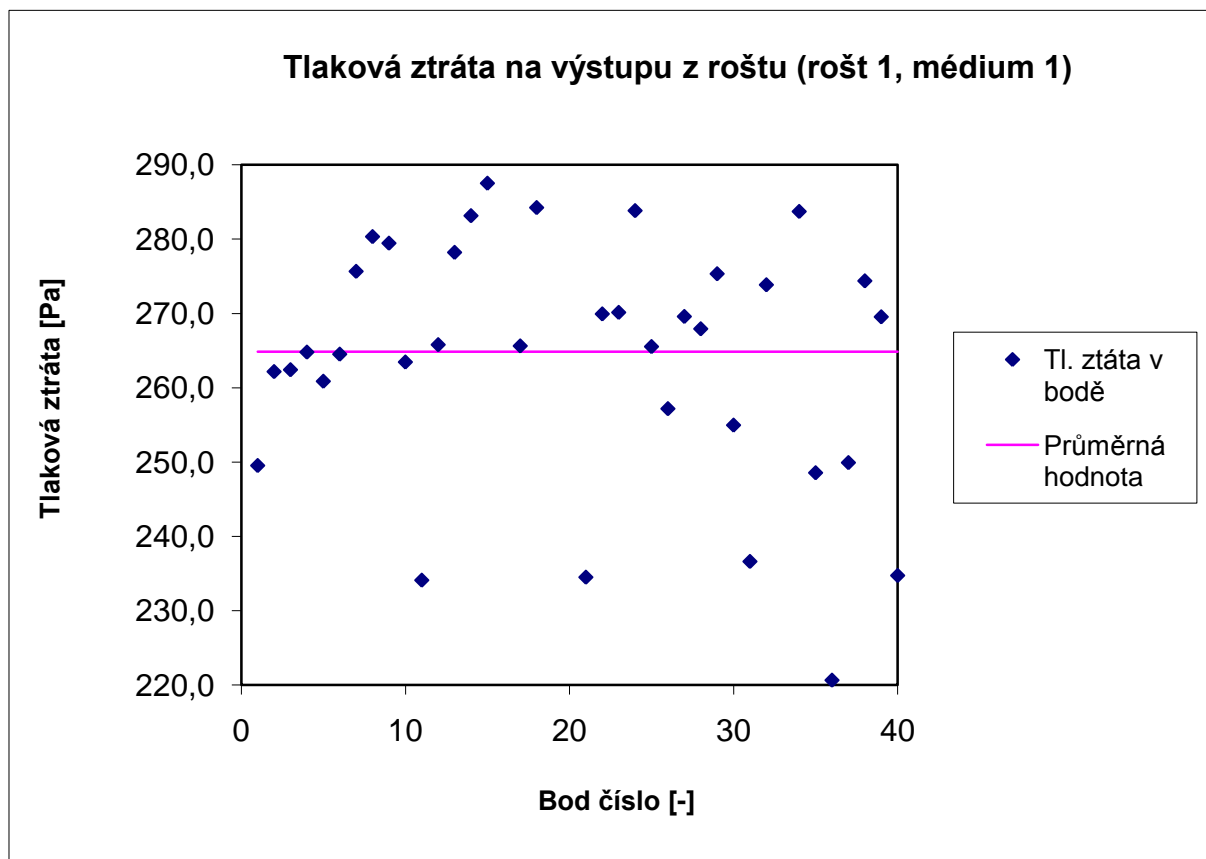
Hodnoty v jednotlivých odběrných místech byly zprůměrovány a výsledná tlaková ztráta je uvedena v grafu na obrázku (obr. 40).



Obr. 39: Tlakové ztráty na prvním roštu

Tab. 11: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (1. rošt, médium 1)

Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]
1	249,5	11	234,1	21	234,5	31	236,6
2	262,2	12	265,8	22	269,9	32	273,9
3	262,4	13	278,2	23	270,1	33	291,5
4	264,8	14	283,2	24	283,8	34	283,7
5	260,9	15	287,5	25	265,5	35	248,5
6	264,5	16	210,0	26	257,2	36	220,6
7	275,7	17	265,6	27	269,6	37	249,9
8	280,3	18	284,2	28	267,9	38	274,4
9	279,5	19	296,1	29	275,3	39	269,5
10	263,5	20	294,1	30	255,0	40	234,7



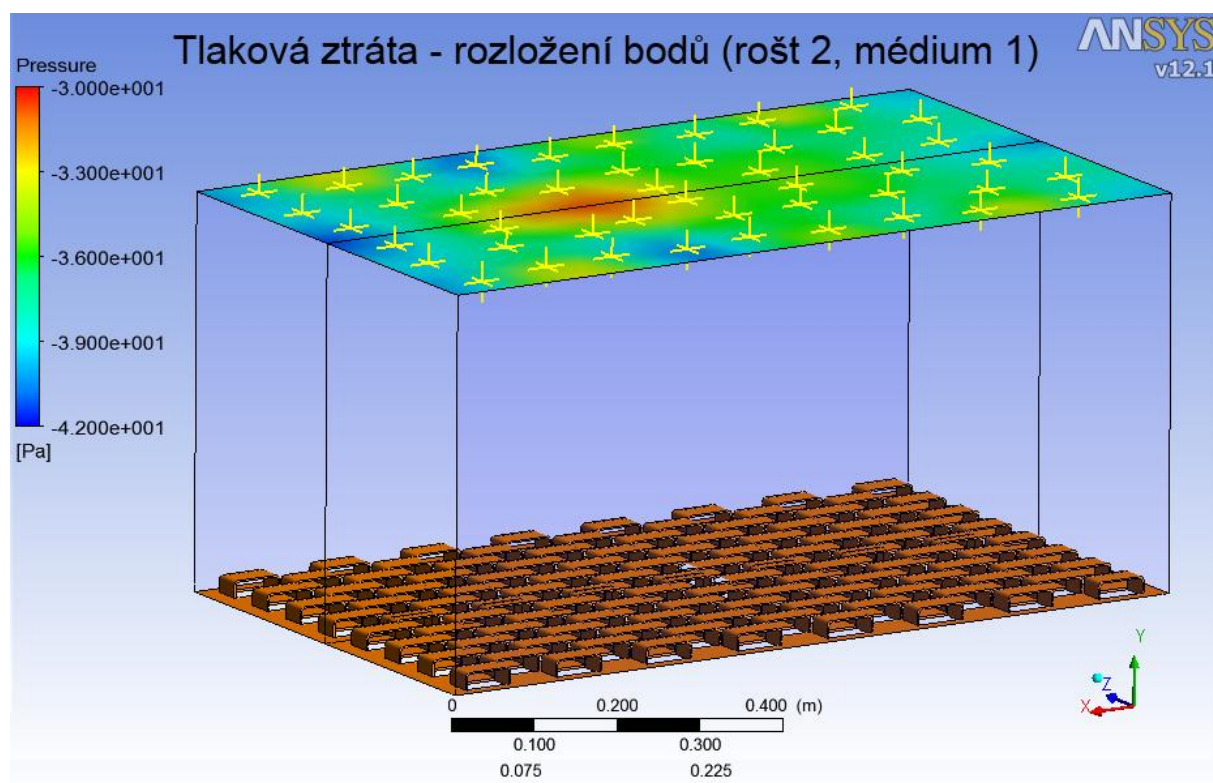
Obr. 40: Znázornění tlakové ztráty v grafu (rošt 1, médium 1)

Průměrná hodnota tlakové ztráty fluidního roštu (rošt 1, médium 1) Δp_R je 264,87 Pa.

6.2. Tlaková ztráta na druhém roštu (médium 1)

Tlaková ztráta na druhém roštu byla určena obdobným způsobem, jako tomu bylo u prvního roštu. Ovšem v případě druhého roštu se jednalo o velmi složitý model, kde by celý výpočet trval několik desítek hodin. Z důvodu zrychlení výpočtu byla využita při tvorbě symetrie, čímž se o dosáhlo snížení doby výpočtu až o 8 hodin.

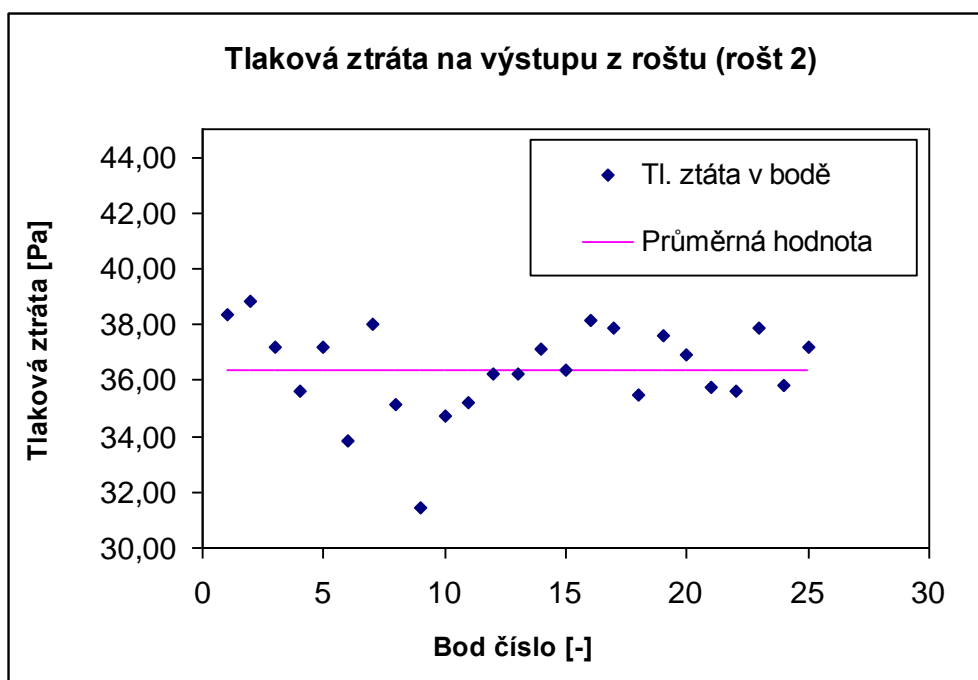
Vzhledem k tomu, že bylo použito při výpočtu symetrie, bylo zvoleno jen 24 odběrných míst, ve kterých byla určena hodnota tlakové ztráty. Jednotlivá odběrná místa jsou znázorněna na obr. 41, přesné hodnoty pak v tabulce pod obrázkem (tab. 12). Z důvodu, že se jednalo o symetrii, byla tedy tlaková ztráta určena v 48 bodech, což je dostatečný počet k tomu, aby byly eliminovány nepřesnosti, které mohly v průběhu výpočtu vzniknout například díky velikosti jednotlivých prvků v síťovém modelu. Výsledná tlaková ztráta je zobrazena v grafu (obr. 42).



Obr. 41: Tlakové ztráty na druhém roštu

Tab. 12: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (2. rošt, médium 1)

Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]
1	38,35	9	31,42	17	37,91
2	38,82	10	34,70	18	35,49
3	37,16	11	35,24	19	37,63
4	35,60	12	36,21	20	36,90
5	37,20	13	36,22	21	35,78
6	33,84	14	37,10	22	35,63
7	37,98	15	36,37	23	37,89
8	35,15	16	38,17	24	35,83

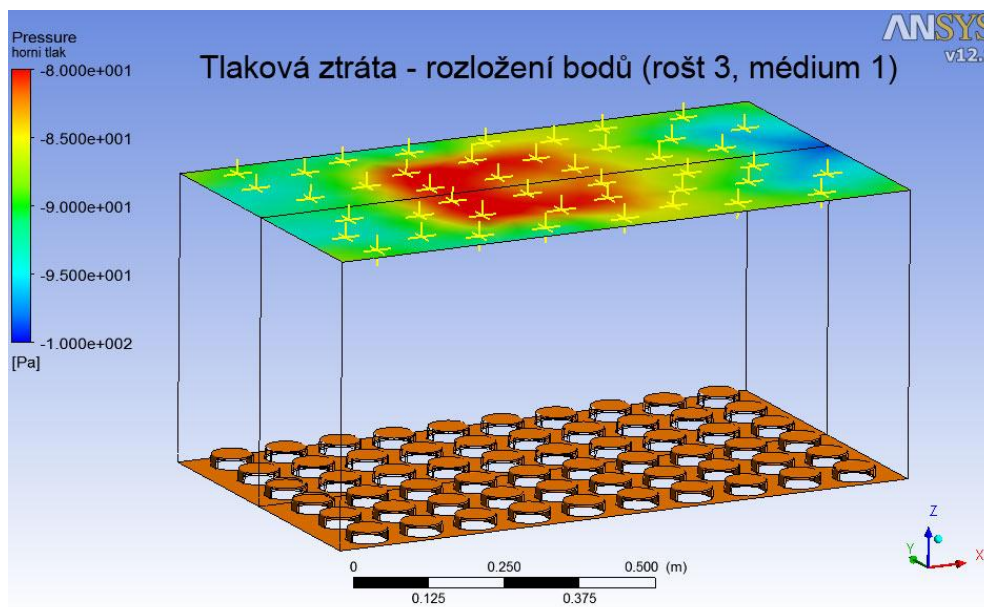


Obr. 42: Znárodnění tlakové ztráty v grafu (rošt 2, médium 1)

Průměrná hodnota tlakové ztráty fluidního roštu (rošt 2, médium 1) Δp_R je 36,36 Pa.

6.3. Tlaková ztráta na třetím roštu (médium 1)

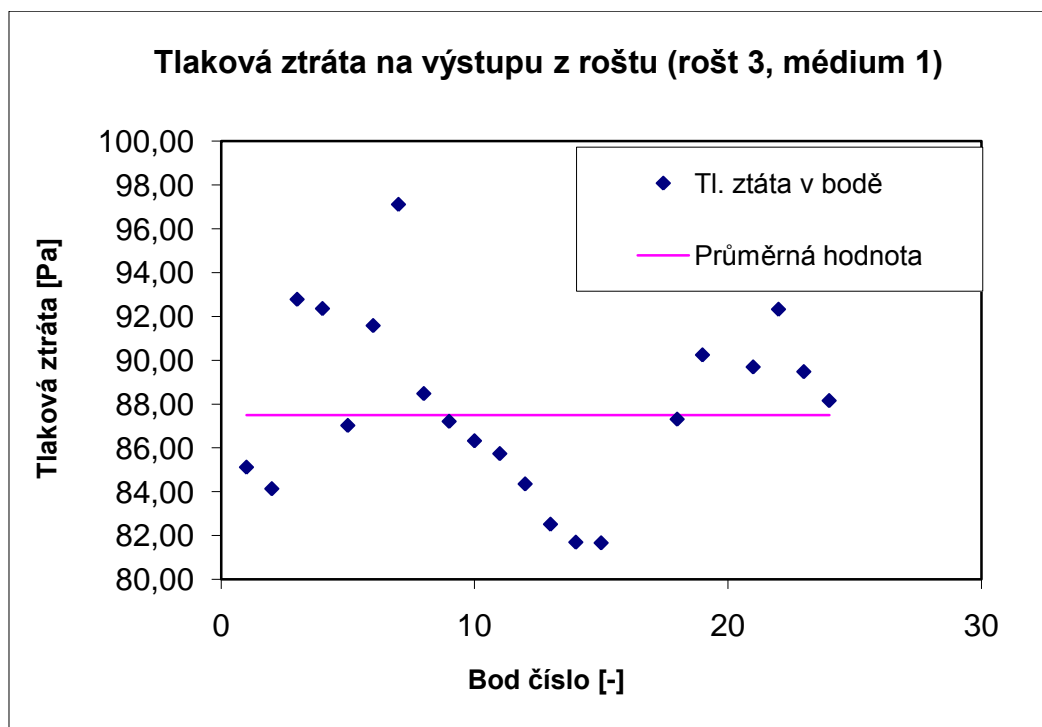
Při experimentu na třetím roštu se postupovalo stejně, jak tomu bylo u druhého roštu. Bylo využito symetrie pro zjednodušení modelu. Velikost tlakové ztráty byla určena v 24 bodech (obr. 43.). Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tab. 13. Výsledná tlaková ztráta pak uvedena v grafu (obr. 44).



Obr. 43: Tlakové ztráty na třetím roštu (médium 1)

Tab. 13: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (3. rošt, médium 1)

Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]
1	85,12	9	87,21	17	79,12
2	84,14	10	86,32	18	87,31
3	92,78	11	85,74	19	90,24
4	92,35	12	84,36	20	96,35
5	87,02	13	82,52	21	89,69
6	91,58	14	81,70	22	92,32
7	97,11	15	81,67	23	89,48
8	88,48	16	78,98	24	88,16

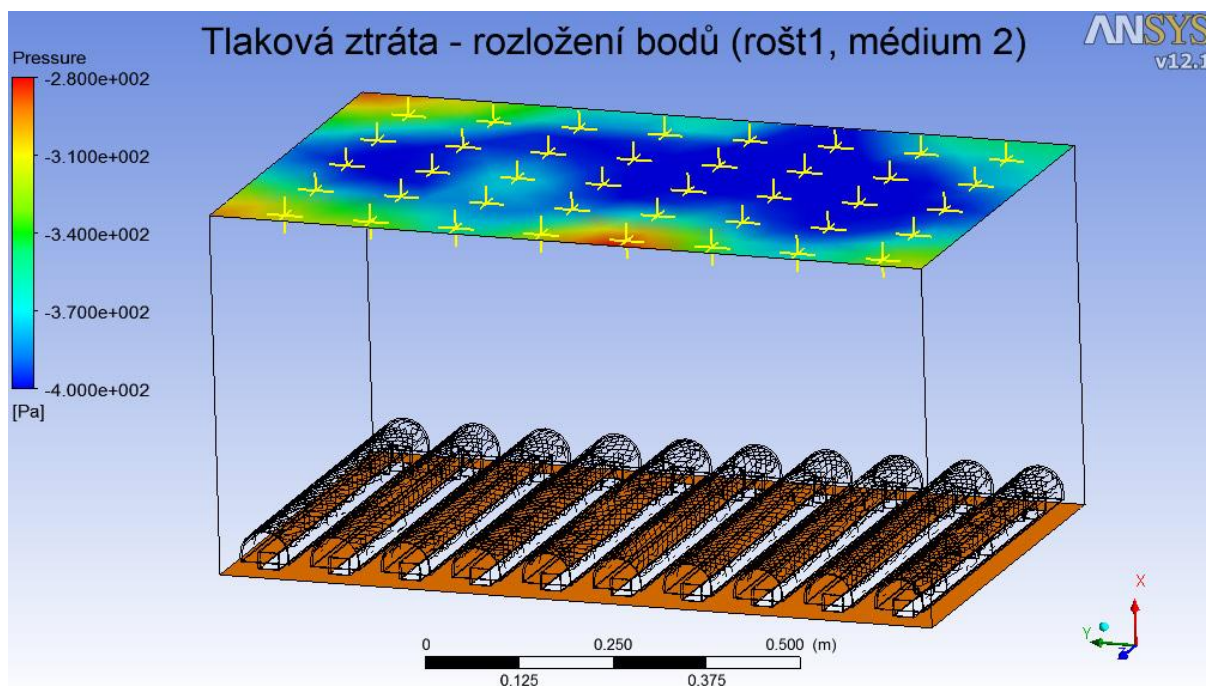


Obr. 44: Znárodnění tlakové ztráty v grafu (rošt 3, médium 1)

Průměrná hodnota tlakové ztráty třetího roštu (rošt 3, médium 1) Δp_R je 87,49 Pa.

6.4. Tlaková ztráta na prvním roštu (médium 2)

V případě média dva se postupovalo obdobným způsobem jako v případě média jedna. Vzorky byly odebrány ve stejných místech. Odběrné body jsou zobrazeny na obr. 45. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tabulce 14.

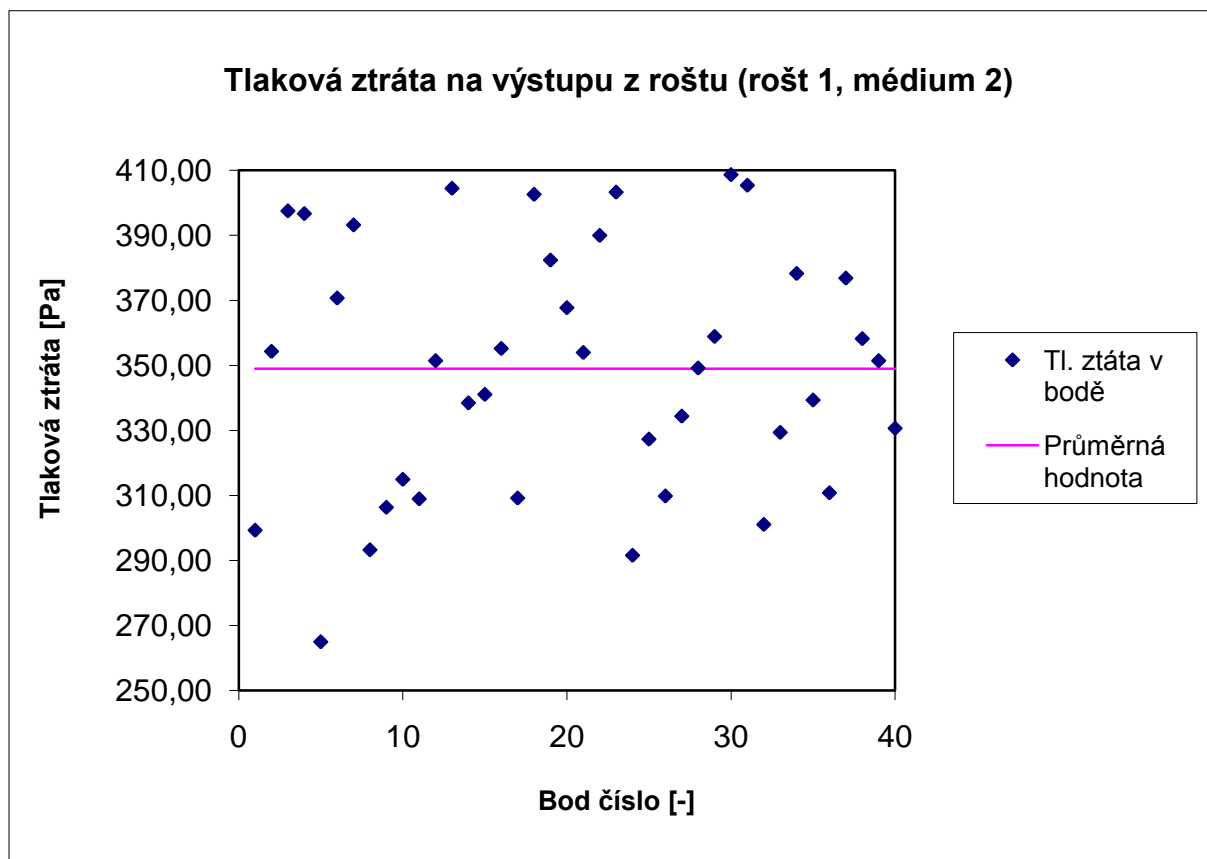


Obr. 45: Tlakové ztráty na prvním roštu (rošt 1, médium 2)

Tab. 14: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (1. rošt, médium 2)

Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]
1	299,29	11	308,94	21	353,97	31	405,38
2	354,31	12	351,43	22	389,96	32	301,08
3	397,51	13	404,46	23	403,28	33	329,38
4	396,67	14	338,45	24	291,58	34	378,26
5	264,97	15	341,07	25	327,32	35	339,34
6	370,71	16	355,20	26	309,83	36	310,81
7	393,19	17	309,19	27	334,38	37	376,85

8	293,27	18	402,59	28	349,19	38	358,22
9	306,33	19	382,37	29	358,88	39	351,44
10	314,95	20	367,73	30	408,66	40	330,65

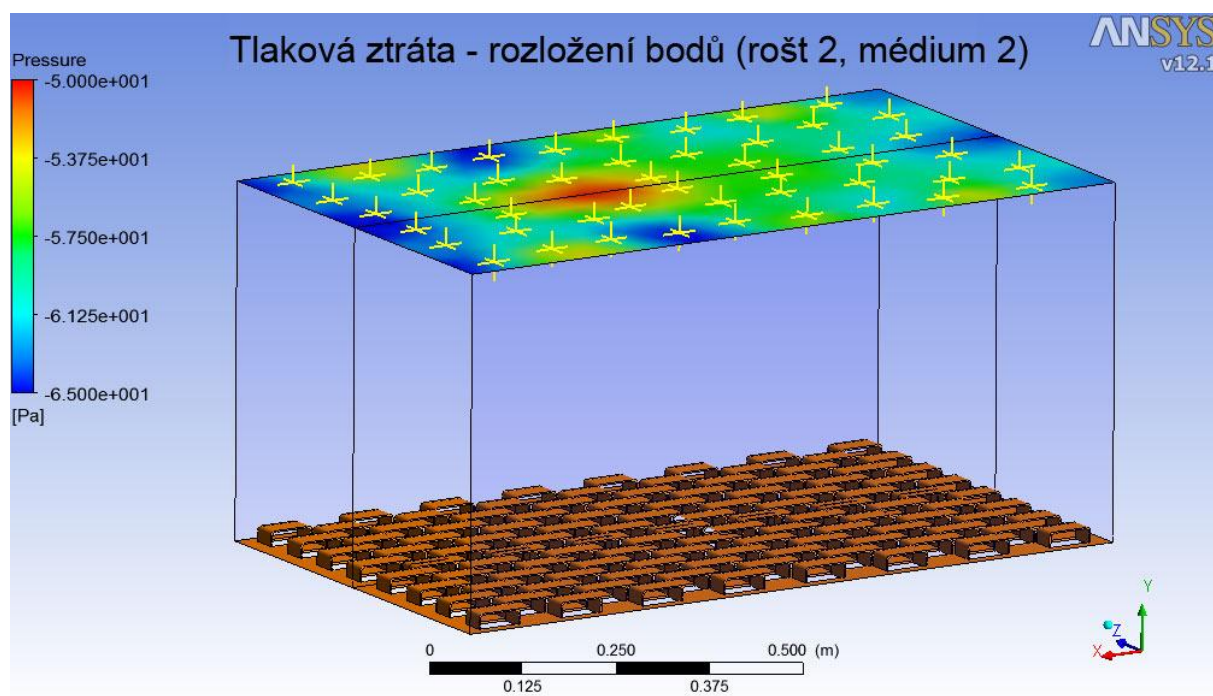


Obr. 46: Znárodnění tlakové ztráty v grafu (rošt 1, médium 2)

Průměrná hodnota tlakové ztráty fluidního roštu (rošt 1, médium 2) Δp_R je 349,00 Pa.

6.5. Tlaková ztráta na druhém roštu (médium 2)

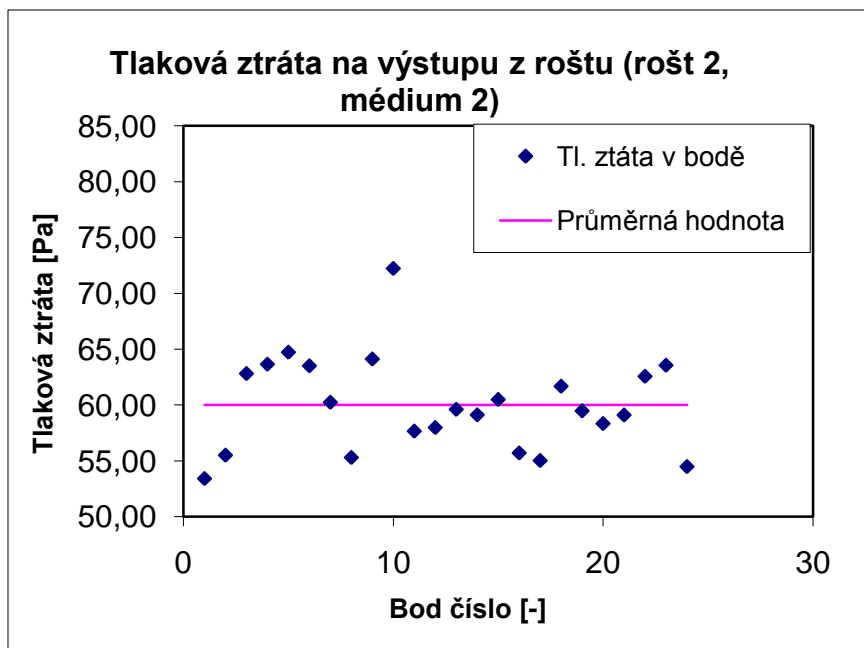
V případě média dva na druhém roštu se postupovalo obdobným způsobem jako v případě média jedna. Vzorky byly odebrány ve stejných místech. Odběrné body jsou zobrazeny na obr. 47. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tabulce 15.



Obr. 47: Tlakové ztráty na druhém roštu (rošt 2, médium 2)

Tab. 15: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (rošt 2, médium 2)

Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]
1	53,41	9	64,13	17	55,03
2	55,50	10	72,24	18	61,69
3	62,82	11	57,66	19	59,48
4	63,66	12	57,98	20	58,34
5	64,73	13	59,61	21	59,11
6	63,52	14	59,12	22	62,58
7	60,25	15	60,50	23	63,57
8	55,30	16	55,71	24	54,48

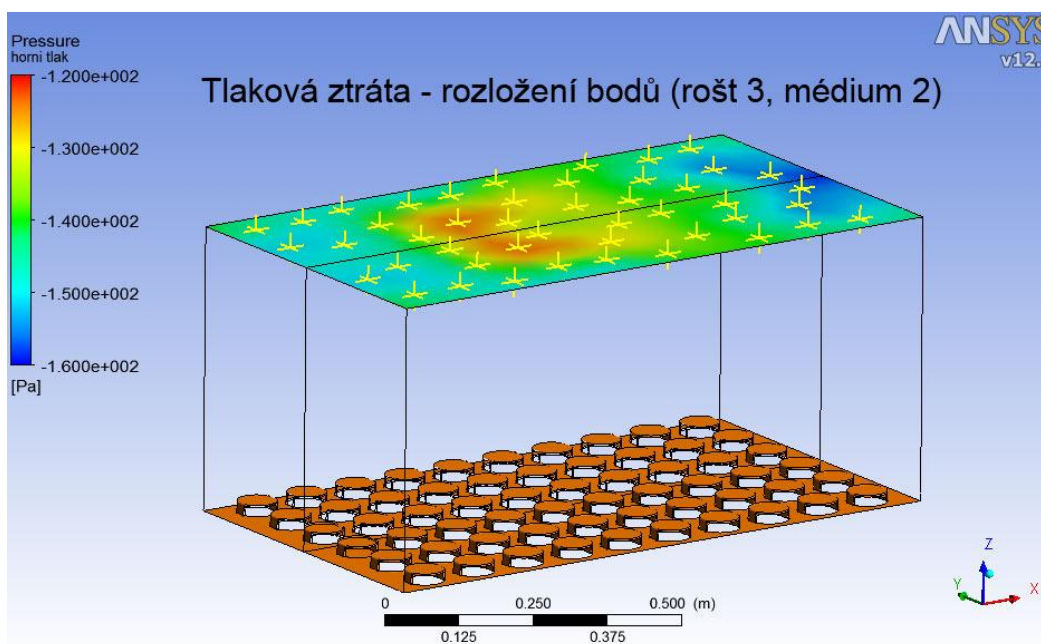


Obr. 48: Znázornění tlakové ztráty v grafu (rošt 2, médium 2)

Průměrná hodnota tlakové ztráty fluidního roštu (rošt 2, médium 2) Δp_R je 60,02 Pa.

6.6. Tlaková ztráta na třetím roštu (médium 2)

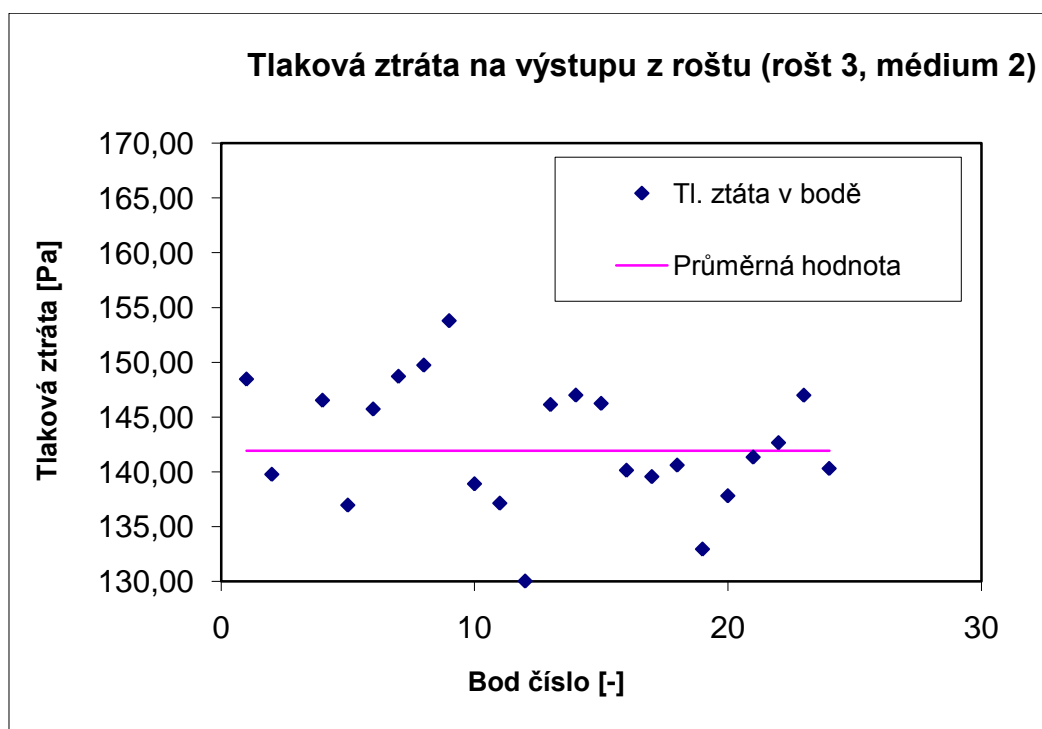
V případě média dva na roštu tři se postupovalo obdobným způsobem jako v případě média jedna. Vzorky byly odebrány ve stejných místech. Odběrné body jsou zobrazeny na obr. 49. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tabulce 16.



Obr. 49: Tlakové ztráty na třetím roštu (médium 2)

Tab. 16: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (3. rošt, médium 2)

Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]	Bod č.	Tlaková ztráta [Pa]
1	148,46	9	153,78	17	139,55
2	139,77	10	138,90	18	140,61
3	128,53	11	137,13	19	132,94
4	146,52	12	130,02	20	137,81
5	136,96	13	146,13	21	141,33
6	145,72	14	146,99	22	142,65
7	148,71	15	146,24	23	146,98
8	149,73	16	140,14	24	140,30



Obr. 50: Znárodnění tlakové ztráty v grafu (rošt 3, médium 2)

Průměrná hodnota tlakové ztráty fluidního roštu Δp_R je 141,91 Pa.

6.7. Výpočet tlakového poměru na prvním roštu

a) pro médium 1 (vzduch)

$$\frac{\Delta p_R}{\Delta p_F} = \langle 0,02; 0,5 \rangle \quad \text{Vzorec (6.1)}$$

$$p_{V1} = \frac{\Delta p_{RV1}}{\Delta p_F} \quad \text{Vzorec (6.2)}$$

$$p_{V1} = 0,156 \quad \text{Vzorec (6.3)}$$

b) pro médium 2 (vodní pára)

$$p_{P1} = \frac{\Delta p_{RP1}}{\Delta p_F} \quad \text{Vzorec (6.4)}$$

$$p_{P1} = 0,205 \quad \text{Vzorec (6.5)}$$

6.8. Výpočet tlakového poměru na druhém roštu

a) pro médium 1 (vzduch)

$$p_{V2} = \frac{\Delta p_{RV2}}{\Delta p_F} \quad \text{Vzorec (6.6)}$$

$$p_{V2} = 0,021 \quad \text{Vzorec (6.7)}$$

b) pro médium 2 (vodní pára)

$$p_{P2} = \frac{\Delta p_{RP2}}{\Delta p_F} \quad \text{Vzorec (6.8)}$$

$$p_{P2} = 0,035 \quad \text{Vzorec (6.9)}$$

6.9. Výpočet tlakového poměru na třetím roštu

a) pro médium 1 (vzduch)

$$\frac{\Delta p_R}{\Delta p_F} = \langle 0,02; 0,5 \rangle \quad \text{Vzorec (6.10)}$$

$$p_{V3} = \frac{\Delta p_{RV3}}{\Delta p_F} \quad \text{Vzorec (6.11)}$$

$$p_{V3} = 0,051 \quad \text{Vzorec (6.12)}$$

b) pro médium 2 (vodní pára)

$$p_{P3} = \frac{\Delta p_{RP3}}{\Delta p_F} \quad \text{Vzorec (6.13)}$$

$$p_{P3} = 0,083 \quad \text{Vzorec (6.14)}$$

6.10. Výsledné tlakové poměry

Výsledné tlakové poměry jsou uvedeny v tabulce 17, kde je možné jednotlivé tlakové poměry porovnat.

Z výsledků v tabulce 17 je patrné, že všechny námi navržené rošty je možné v praxi využít. První rošt vyhovuje zadaným parametrům, a proto tento rošt lze bez problémů použít.

U druhého roštu vychází poměr velice blízko okrajové hranici intervalu, v případě tohoto roštu může vznikat fluidizační vrstva o něco obtížněji, než je tomu u prvního roštu. Nicméně by se měla vytvořit, protože daná hodnota spadá do intervalu doporučovaných hodnot.

V případě, že by byly náklady na výrobu roštu 2 mnohem výhodnější, byl by vybrán právě tento rošt i přesto, že se na něm tvoří fluidní vrstva o něco obtížněji.

Hodnoty tlakových poměrů na třetím roštu zapadají do intervalu doporučených hodnot tlakového poměru, a proto by se v daném případě měla fluidní vrstva bez problémů vytvořit.

Tab. 17: Tlakové poměry na jednotlivých roštech

Doporučená intervalová hodnota	0,02 až 0,5
Tlakový poměr na prvním roštu	
Médium 1 (vzduch)	$p_{V1} = 0,156$
Médium 2 (vodní pára)	$p_{P1} = 0,205$
Tlakový poměr na druhém roštu	
Médium 1 (vzduch)	$p_{V2} = 0,021$
Médium 2 (vodní pára)	$p_{P2} = 0,035$

Tlakový poměr na třetím roštu	
Médium 1 (vzduch)	$p_{V3} = 0,051$
Médium 2 (vodní pára)	$p_{P3} = 0,083$

7. Ekonomická analýza jednotlivých roštů

V této kapitole byla zpracována ekonomická analýza navrhovaných fluidních roštů. Ekonomická analýza si bere za cíl srovnání roštů z hlediska ekonomického, tedy ceny. Ekonomická analýza tudíž nebere v potaz stránku funkčnosti daného zařízení jako takového (viz tab. 18). Ovšem nemám smysl zahrnovat do ekonomické analýzy taková řešení, které se z hlediska funkčního úplně vylučují. Kde poměr tlakových ztrát výrazně vybočuje z doporučených hodnot. Naštěstí všechny navrhované rošty z funkčního hlediska vyhovují, a proto mohou být všechny tři rošty podrobeny ekonomické analýze.

Aby bylo možné ekonomicky srovnat jednotlivá navrhovaná řešení, bylo nejdříve nutné vytvořit výkresovou dokumentaci k jednotlivým roštům. Výkresy sestav včetně příloh jsou uvedeny v příloze (rošt druhý – příloha 3, třetí rošt – příloha 6). Výkres prvního roštu nebyl vypracován, protože je chráněn autorskými právy společnosti Tenza a.s..

Celkové náklady na výrobu roštů se skládají z několika částí. První část tvoří náklady za materiál, které obsahují cenu materiálu, včetně dělení laserem a následného ohýbání jednotlivých částí pomocí ohraňovacího lisu. Druhou část nákladů tvoří náklady za svařování. Třetí část je tvořena náklady na přepravu z místa výroby do areálu společnosti Tenza a.s..

Poslední část nákladů na rošt tvoří přepravní náklady. Tyto náklady mohou být odhadnuty, protože nemají žádný zásadní vliv na výběr řešení. Náklady na přepravu jednotlivých roštů jsou shodné, ale i přesto by neměly být v ekonomické analýze opomíjeny.

7.1. Materiálové náklady

Návrhy fluidních roštů byly naceněny ve společnosti ATONA s.r.o. Tato firma patří mezi přední firmy zabývající se strojírenskou výrobou v našem kraji. Poptávka byla provedena na 30 ks a jako materiál byla použita ocel 11 373.

Materiálové náklady na první rošt

Výkresová dokumentace prvního roštu je uvedena v **příloze 1**.

Jednotlivé položky odpovídají pozicím na výkrese.

Tab. 18: Ceník jednotlivých dílů – pro první roštu (materiálové náklady)

Pozice na výkrese	Název dílu	Cena 1 ks (včetně DPH)
1	Plech 1010x600x3	843,60 Kč
2	Plech 546x11x2	30,00 Kč
3	Plech 23x30x2	3,60 Kč
4	Plech 516x23x2	33,60 Kč
5	Plech 43x30x2	4,20 Kč
6	Plech 60x40x2	6,00 Kč

Tab. 19: Celková cena prvního roštu (materiálové náklady)

Pozice na výkrese	Název dílu	Počet ks na jednom roštu	Cena (včetně DPH)
1	Plech 1010x600x3	1	843,60 Kč
2	Plech 546x11x2	10	300,00 Kč
3	Plech 23x30x2	20	72,00 Kč
4	Plech 516x23x2	30	999,00 Kč
5	Plech 43x30x2	30	126,00 Kč
6	Plech 60x40x2	20	120,00 Kč
Náklady na celý rošt			2 460,60 Kč

Celková cena za materiálovou část nákladů prvního roštu je 2 460,60Kč.

Materiálové náklady na druhý rošt

Z výkresové dokumentace lze předpokládat, že druhý rošt bude ve srovnání s prvním roštěm cenově nákladnější, protože obsahuje velké množství ohýbaných částí, které mohou způsobit navýšení materiálových nákladů. Výkresová dokumentace druhého roštu je uvedena v **příloze 2**.

Jednotlivé položky odpovídají názvům výkresů.

Tab. 20: Ceník jednotlivých dílů – pro druhý rošt (materiálové náklady)

Název výkresu	Název dílu	Cena 1 ks (včetně DPH)
A3-2010-0102	Plech 1010x600x3	1 218,60 Kč
A4-2010-0101	Plech - PATKA	21,00 Kč

Tab. 21: Celková cena druhého roštu (materiálové náklady)

Název výkresu	Název dílu	Počet ks na jednom roštu	Cena (včetně DPH)
A3-2010-0102	Plech 1010x600x3	1	1 218,60 Kč
A4-2010-0101	Plech - PATKA	113	2 373,00 Kč
Náklady na celý rošt			3 591,60 Kč

Celkové materiálové náklady na druhý rošt činí 3 591,60 Kč.

V případě pouhého porovnání nákladů spojených s materiálem by se dalo dojít k závěru, že první rošt je cenově výhodnější oproti roštu druhému. Jeho materiálové náklady jsou o 46 % nižší, což je výrazná úspora. Na druhou stranu jsou do ceny materiálu zahrnuty také náklady za ohýbání plechových dílů na ohraňovacím lisu. Zejména tento fakt v případě druhého roštu způsobuje výrazné navýšení ceny. Avšak i celkové náklady na první rošt mohou být nakonec mnohem vyšší kvůli složitějším svářecím operacím. Proto by bylo nerozumné provádět závěr ekonomického zhodnocení jen na základě ceny materiálu a jeho dělení.

Zároveň můžeme předpokládat, že cena materiálů na výrobu třetího roštu bude vyšší ve srovnání s ostatními rošty, protože ohýbané díly jsou konstrukčně složitější a rozměrnější než v případě druhého roštu. A právě ohýbání na ohraňovacím lisu hraje zásadní roli v případě materiálových nákladů.

Materiálové náklady na třetí rošt

Výkresová dokumentace druhého roštu je uvedena v **příloze 3**.

Jednotlivé položky odpovídají názvům výkresů.

Tab. 22: Ceník jednotlivých dílů – pro třetí rošt (materiálové náklady)

Název výkresu	Název dílu	Cena 1 ks (včetně DPH)
A3-2010-0202	Plech 1010x600x3	1 104,00 Kč
A4-2010-0201	Plech – PATKA2	27,60 Kč

Tab. 23: Celková cena třetího roštu (materiálové náklady)

Název výkresu	Název dílu	Počet ks na jednom roštu	Cena (včetně DPH)
A3-2010-0202	Plech 1010x600x3	1	1 104,00 Kč
A4-2010-0201	Plech – PATKA2	60	1 656,00 Kč
Náklady na celý rošt			2 760,00 Kč

Celkové materiálové náklady na třetí rošt jsou 2 760,00 Kč.

Z ceny třetího roštu vyplývá, že navzdory tomu, že obsahuje větší a složitější konstrukční prvky oproti druhému roštu, je cenově výhodnější než rošt s více prvky.

7.2. Náklady na svařování

Detailní cenová kalkulace na svařování byla vypracována ve spolupráci se zámečnickou firmou pana Miroslava Nečase, která sídlí v obci Jedovnice. V případě prvního roštu byla použita metoda MAG s ochrannou atmosférou CO₂, v případě roštu druhého bylo využito bodového svařování.

Náklady na svařování prvního roštu

Pro svařování prvního roštu byla vybrána metoda svařování MAG v ochranné atmosféře CO₂. Tento způsob svařování patří v současné době k nejoblíbenějším, zejména díky výhodám, které oproti svařování elektrickým obloukem přináší.

Výhody svařování v ochranné atmosféře CO₂:

- Široká dostupnost, nízké pořizovací náklady
- Malé tepelné ovlivnění materiálu v blízkosti varu
- Nedochází k přesušování elektrod
- Ideální pro tenké plechy

Výkresová dokumentace prvního roštu je poměrně složitá, a proto je třeba vytvořit svařovací přípravky, které ulehčí svařování a zkrátí čas potřebný k výrobě. V neposlední řadě výroba s přípravky je mnohem přesnější a efektivnější než výroba bez přípravků. V některých případech je dokonce výroba bez přípravků nemožná. V případě, že by se jednalo o jeden nebo dva rošty je možno rošt svařit i bez přípravků na svařování, ale za cenu vyšší nepřesnosti a především delší doby potřebné k svařování, která se může v daném případě vyšplhat až trojnásobek.

Cena přípravku na svařování pásu se pohybuje mezi pěti až šesti tisíci korun českých. Cena se odvíjí dle složitosti.

Čas potřebný ke svaření jednoho roštu (rošt 1)

$$t_{R1tot} = n \cdot t_{1KOR}, \quad \text{Vzorec (7.1)}$$

kde

n ... počet jednotlivých segmentů [-]

t_{1KOR} ... čas potřebný na svaření jednoho segmentu [min]

$$t_{R1tot} = 10.15 \quad \text{Vzorec (7.2)}$$

$$t_{R1tot} = 2,5h \quad \text{Vzorec (7.3)}$$

Cena svařování prvního roštu

$$cena_{R1} = Rn \cdot t_{R1tot} \quad \text{Vzorec (7.4)}$$

kde

$cena_{R1}$... cena za svařování prvního roštu [Kč]

Rn_{CO2} ... režijní náklady na CO₂ svařování [Kč/h]

t_{R1tot} ... celkový čas svařování [min]

$$cena_{R1} = 450.2,5, \quad \text{Vzorec (7.5)}$$

$$cena_{R1} = 1\,125\text{Kč} \quad \text{Vzorec (7.6)}$$

Cena svařovacího přípravku na jeden ks

$$cena_{PŘ1} = \frac{cena_{PŘ}}{n_R}, \quad \text{Vzorec (7.7)}$$

kde

$cena_{PŘ1}$...cena přípravku přepočtena na jeden ks [Kč]

$cena_{PŘ}$...cena přípravku [Kč]

n_R ... počet vyráběných roštů [min]

$$cena_{PŘ1} = \frac{5000}{30} \quad \text{Vzorec (7.8)}$$

$$cena_{PŘ1} = 166,70\text{Kč} \quad \text{Vzorec (7.9)}$$

Tab. 24: Náklady na svařování prvního roštu (1 ks)

Cena svařování 1 ks	1 125,00 Kč
Cena svařování 1 ks včetně přípravku	1 291,70 Kč

Náklady na svařování druhého roštu

Po vzájemné diskuzi se zámečnictvím Miroslav Nečas byla vybrána metoda bodového svařování jako optimální pro druhý rošt. Bodové svařování má značné výhody oproti svařování metodou MAG. Tato metoda je hojně používána např. při svařování tenkých plechů v automobilovém průmyslu. Její výhody jsou především malá tepelně ovlivněná oblast materiálu a zejména rychlost svařování, která výrazně zvyšuje produktivitu práce.

V případě druhého roštu nejsou ke svařování potřeba svařovací přípravky, proto tato část nákladů na svařování odpadá. Svařování bude provedeno pomocí čtyř bodů. Poloha bodů je uvedena na výkresové dokumentaci (příloha 3).

Doba potřebná na jeden bodový svar

$$t_{1SE} = t_{sv} + t_{př}, \quad \text{Vzorec (7.10)}$$

kde

t_{1SE} ... doba potřebná na jeden bodový svar segment [s]

t_{sv} ... doba svařování jednoho bodu [s]

$t_{př}$... doba potřebná k přejezdu na další svar [s]

$$t_{1SE} = 3 + 5 = 8s \quad \text{Vzorec (7.11)}$$

$$t_{1SE} = 8s \quad \text{Vzorec (7.12)}$$

Celkový čas svařování (rošt 2)

$$t_{R2tot} = n \cdot t_{1SE} \cdot n_B, \quad \text{Vzorec (7.13)}$$

kde

t_{R2tot} ... celkový čas ke svaření [min]

n ... počet segmentů [-]

n_B ... počet bodových svarů na jednom segmentu [-]

$$t_{R2tot} = 113.4.8, \quad \text{Vzorec (7.14)}$$

$$t_{R2tot} = 61 \text{ min} \quad \text{Vzorec (7.15)}$$

Cena svařování druhého roštu

$$cena_{R2} = Rn \cdot t_{R2tot}, \quad \text{Vzorec (7.16)}$$

kde

$cena_{R2}$... cena za svařování druhého roštu [Kč]

Rn ... režijní náklady na bodové svařování [Kč/h]

$$cena_{R2} = 450.1,004, \quad \text{Vzorec (7.17)}$$

$$cena_{R2} = 452,00Kč \quad \text{Vzorec (7.18)}$$

Tab. 25: Náklady na svařování druhého roštu (1 ks)

Cena svařování 1 ks	452,00 Kč
---------------------	-----------

Náklady na svařování třetího roštu

Po konstrukční stránce je třetí rošt velice podobný druhému roštu, jen tvar jednotlivých segmentů je vylepšen a nahrazen segmenty kruhovitěho tvaru o průměru 75 mm. Kompletní výkresová dokumentace je uvedena v příloze 3.

Stejně jako u druhého roštu nejsou k výrobě potřeba svařovací přípravky, a proto tato část nákladů na svařování odpadá. Svařování bude provedeno pomocí čtyř bodů. Poloha bodů je uvedena na výkresové dokumentaci (příloha 6).

Doba potřebná k provedení 1 svaru je shodná s případem druhého roštu, režijní náklady jsou také shodné.

Doba potřebná na jeden bodový svar

$$t_{1SE} = t_{sv} + t_{př}, \quad \text{Vzorec (7.19)}$$

kde

t_{1SE} ... doba potřebná na jeden bodový svar segment [s]

t_{sv} ... doba svařování jednoho bodu [s]

$t_{př}$... doba potřebná k přejezdu na další svar [s]

$$t_{1SE} = 3 + 5 = 8s, \quad \text{Vzorec (7.20)}$$

$$t_{1SE} = 8s, \quad \text{Vzorec (7.21)}$$

Celkový čas svařování (rošt 3)

$$t_{R3tot} = n \cdot t_{1SE} \cdot n_B, \quad \text{Vzorec (7.22)}$$

kde

t_{R3tot} ... celkový čas ke svaření [min]

n ... počet segmentů [-]

n_B ... počet bodových svarů na jednom segmentu [-]

$$t_{R3tot} = 60.4.8 , \quad \text{Vzorec (7.23)}$$

$$t_{R3tot} = 33 \text{ min} , \quad \text{Vzorec (7.24)}$$

Cena svařování druhého roštu

$$cena_{R3} = Rn.t_{R3tot} , \quad \text{Vzorec (7.25)}$$

kde

$cena_{R3}$...cena za svařování třetího roštu [Kč]

Rn ...režijní náklady na bodové svařování [Kč/h]

$$cena_{R3} = 450.0,533 , \quad \text{Vzorec (7.26)}$$

$$cena_{R3} = 240,00 \text{ Kč} . \quad \text{Vzorec (7.27)}$$

Tab. 26: Náklady na svařování třetího roštu (1 ks)

Cena svařování 1 ks	240,00 Kč
---------------------	-----------

Z hlediska svařování jednoznačně vychází, že náklady na svařování třetího roštu jsou nejnižší. V porovnání s prvním roštěm jsou náklady na třetí rošt pětinaové.

7.3. Náklady na přepravu

Náklady na přepravu jsou stanoveny fixně 1200 Kč. V případě třiceti roštů jsou tedy přepravní náklady $cena_{AU}$ na jeden rošt 40 Kč.

7.4. Celkové náklady na výrobu roštů

Celkové náklady na výrobu jednotlivých roštů jsou uvedeny v tabulce 27. Cena se vztahuje na jeden rošt.

Tab. 27: Celkové náklady na výrobu jednoho roštu

	Rošt 1	Rošt 2	Rošt 3
Náklady materiál	2 460,60 Kč	3 591,60 Kč	2 760,00 Kč
Náklady na svařování	1 291,60 Kč	452,00 Kč	240,00 Kč
Náklady na přepravu	40,00 Kč	40,00 Kč	40,00 Kč
Celkem	3 792,20 Kč	4 083,60Kč	3 040,00 Kč

Z výše uvedené tabulky (tab. 27) vyplývá, že výroba třetího roštu je z ekonomického hlediska nejvýhodnější, oproti původnímu zadání zde dochází k úspoře nákladů na výrobu téměř o 25 %. Zároveň je však zajímavé, že druhý rošt, který se konstrukčně od třetího roštu liší jen minimálně, je výrazně dražší než třetí rošt. Tento cenový rozdíl vzniká díky tomu, že druhý rošt obsahuje 113 ohýbaných segmentů a třetí rošt jich má pouze 60, což výrazně snižuje náklady na výrobu.

8. Porovnání roštů z hlediska funkčnosti a ekonomiky výroby

Abychom dosáhli co nejvyšší efektivity při návrhu, je nutné, aby bylo porovnáno nejen hledisko funkčnosti a ekonomiky výroby, ale aby byla porovnána tato hlediska zároveň.

V tabulce jsou uvedeny základní parametry pro srovnání ekonomického a funkčního hlediska pro optimalizaci návrhu roštu.

Tab. 28: Technicko-ekonomické zhodnocení

	Rošt 1	Rošt 2	Rošt 3
Tlaková poměr ztrát (vzduch)	0,156	0,021	0,051
Tlakový poměr ztrát (pára)	0,205	0,035	0,083
Celkové náklady	3 792,00 Kč	4 083,60 Kč	3 040,00 Kč
Poznámka	Nejvhodnější fluidizace	Obtížnější fluidizace	
Nejvhodnější varianta			X

Jako nevhodnější varianta byl vybrán rošt 3.

9. Doporučení nevhodnějšího roštu a zpracování výrobního výkresu

Jako nevhodnější variantu pro výrobu fluidního roštu jsem vybral variantu číslo tři. Tato varianta je výhodná nejen po ekonomické stránce (viz tab. 27), která vychází cenově nejvýhodněji vzhledem k ostatním variantám, ale také po stránce funkčnosti (viz tab. 17), kde tato varianta dosahuje optimálního tlakového poměru. Není tedy důvod nezvolit fluidní rošt číslo 3, jenž je nejvýhodnější variantou ze všech tří navrhovaných (viz kapitola 3).

Výrobní výkres sestavy roštu včetně jednotlivých součástí je uveden v příloze (příloha 6).

Rošt, který byl předložen zadavatelem diplomové práce jako součást zadání, nakonec nebyl zvolen jako nejlepší, ale obsadil hned druhé místo, což potvrdilo to, že dodaný rošt byl vytvořen sice bez použití CFD, ale odborníky, kteří rošt navrhli na základě svých dlouholetých zkušeností v oboru.

10. Závěr

Během diplomové práce byly navrženy a následně simulovány tři různé fluidní rošty. První z nich byl dodán společností Tenza a.s., další pak byly navrženy v průběhu psaní diplomové práce. Z průběhů simulace vyšlo najevo, že všechny tři rošty vyhovují a spadají do oblasti doporučených hodnot poměru tlakové ztráty.

Významným kritériem pro volbu roštu se tedy stalo hledisko ekonomické, které hrálo klíčovou roli.

Nejdůležitější roli v oblasti ekonomické, hrají náklady na materiál a svařování. V průběhu řešení byly použity dva odlišné přístupy. Přístup v případě prvního roštu se výrazně liší od roštů, které byly vypracovány v průběhu práce. První rošt obsahoval velké svařované „klobouky“ (viz obr. 6). Další rošty (obr. 7, obr. 8) velké svařované díly neobsahují. Tyto rošty jsou tvořeny jen základním plechem, do kterého jsou vloženy ohýbané segmenty. To značně zjednodušuje konstrukci a snižuje náklady na svařování, kdy může být nahrazeno svařování metodou MAG pouze bodovým svařováním. Druhý rošt obsahuje 113 segmentů a třetí rošt obsahuje větší a daleko složitější segmenty, ale jen v počtu 60 kusů. I tato na první pohled nedůležitá informace vedla k zajímavým závěrům.

Jako nejvýhodnější varianta byl vybrán třetí rošt, který je oproti původnímu zadání o 24 % levnější. Na druhém místě se umístil rošt dodaný společností Tenza a.s.. Na posledním místě skončil rošt druhý, přestože jeho svařovací náklady byly třetinové oproti svařovacím nákladům na rošt číslo jedna. Obsahoval však velké množství segmentů, které rošt ve výsledku prodražily.

Z celkových výsledků vyplývá, že metoda CFD (Computational fluid dynamics – modelování prouděním tekutin) a další numerické metody počítačové analýzy mohou být velmi nápomocné při návrhu a následné optimalizaci sestav a součástí. Zároveň však výsledky ukazují, že pouze znalost počítačových a matematických metod bez předchozích zkušeností v daném oboru k návrhu nestačí.

Díky počítačové simulaci např. v programu Ansys CFX je možné získat celou řadu zajímavých poznatků o chování média během proudění. Získání podobného množství poznatků pomocí experimentů často bývá velice nákladné nebo v některých případech dokonce nemožné. Tyto metody však nemohou být využívány bez experimentů, které jejich správnost ověří. Jednou z nevýhod těchto aplikací je častá nesprávnost řešení. Základním pilířem ke správnému výpočtu je vhodná volba turbulentního modelu, bez kterého často dochází k mylným výsledkům.

Závěrem lze tedy říci, že řešení diplomové práce bylo úspěšné. Během řešení se dospělo k výsledkům, které dokáží ušetřit až 24 % finančních nákladů bez snížení funkčnosti zařízení.

11. Použité zdroje

- [1] Medek J.: Hydraulické pochody, CERM, Brno 2004.
- [2] Pavelek M. a kolektiv: Termomechanika, CERM, Brno 2003.
- [3] Stehlík P., Kohoutek J., Němčanský J.: Tepelné pochody: Výpočet výměníku B tepla, VUT Brno, Brno 1991.
- [4] Hlavačka, V., Valchář, J., Viktorin, Z.: Tepelně technické pochody v systémech plyn-tuhé částice, Praha: SNTL, 1980. 252 s.
- [5] Engineering Toolbox, Air Properties [cit. 10-2-2010].
Dostupné z WWW: <http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html>.
- [6] National Institute of Standards and Technology, NIST Scientific and Technical Databases [cit. 10-2-2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.nist.gov/index.html>>
- [7] GEA Pporcess engineeering Inc., Fluid Bed Processing Systems, [cit. 18-4-2010]. Dostupné z WWW: < <http://www.niroinc.com>>
- [8] Perry, R.H.; Green, D.W. (1997). Perry's Chemical Engineers' Handbook (7th Edition). (pp: 12). McGraw-Hill. Dostupné na: http://knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=48&VerticalID=0

12. Seznam obrázků

Obr. 1: Dvoufázové proudění.....	13
Obr. 2: Konstrukční provedení fluidních komor.....	16
Obr. 3: Konstrukční provedení roštů.....	17
Obr. 4: Průběh tlaku v okolí prahu fluidizace.....	18
Obr. 5: Závislost Reynoldsova čísla na Archimédově čísle.....	21
Obr. 6: Fluidní rošt dodaný společností Tenza, a.s.	25
Obr. 7: Rošt navržený na základě podkladů pro diplomovou práci I.....	26
Obr. 8:Rošt navržený na základě podkladů pro diplomovou práci II.....	26
Obr. 9: Proudové křivky 3D zobrazení (rošt1, médium1).....	32
Obr. 10: Proudové křivky – řez A-A (rošt1, médium1).....	33
Obr. 11: Proudové křivky – řez B-B (rošt1, médium1).....	33
Obr. 12: Průběh tlaku – řez A-A (rošt1, médium1).....	34
Obr. 13: Průběh tlaku – řez B-B (rošt1, médium1).....	34
Obr. 14: Proudové křivky na druhém roštu – 3D pohled (rošt2, médium1).....	35
Obr. 15: Proudové křivky na druhém roštu - řez A-A (rošt2, médium1).....	35
Obr. 16: Proudové křivky na druhém roštu - řez B-B (rošt2, médium1).....	36
Obr. 17: Průběh tlaku na druhém roštu – řez A-A (rošt2, médium1).....	36
Obr. 18: Průběh tlaku na druhém roštu – řez B-B (rošt2, médium1).....	37
Obr. 19: Proudové křivky na třetím roštu – 3D pohled (rošt3, médium1).....	37
Obr. 20: Proudové křivky na třetím roštu – řez A-A (rošt3, médium1).....	38
Obr. 21: Proudové křivky na třetím roštu – řez B-B (rošt3, médium1).....	38
Obr. 22: Průběh tlaku na třetím roštu – řez A-A (rošt3, médium1).....	39
Obr. 23: Průběh tlaku na třetím roštu – řez B-B (rošt3, médium1).....	39
Obr. 24: Proudové křivky na prvním roštu – 3D pohled (rošt 1, médium 2).....	40
Obr. 25: Proudové křivky na prvním roštu – řez A-A (rošt 1, médium 2).....	40
Obr. 26: Proudové křivky na prvním roštu – řez B-B (rošt 1, médium 2).....	41
Obr. 27: Průběh tlaku na prvním roštu – řez A-A (rošt 1, médium 2).....	41
Obr. 28: Průběh tlaku na prvním roštu – řez B-B (rošt 1, médium 2).....	42
Obr. 29: Proudové křivky na druhém roštu – 3D pohled (rošt 2, médium 2).....	42
Obr. 30: Proudové křivky na druhém roštu – řez A-A (rošt 2, médium 2).....	43
Obr. 31: Proudové křivky na druhém roštu – řez B-A (rošt 2, médium 2).....	43
Obr. 32: Průběh tlaku na druhém roštu – řez A-A (rošt 2, médium 2).....	44
Obr. 33: Průběh tlaku na druhém roštu – řez B-B (rošt 2, médium 2).....	44
Obr. 34: Proudové křivky na třetím roštu – 3D pohled (rošt 3, médium 2).....	45
Obr. 35: Proudové křivky - řez A-A (rošt 3, médium 2).....	45
Obr. 36: Proudové křivky - řez A-A (rošt 3, médium 2).....	46
Obr. 37: Průběh tlaku - řez A-A (rošt 3, médium 2).....	46
Obr. 38: Průběh tlaku - řez B-B (rošt 3, médium 2).....	47
Obr. 39: Tlakové ztráty na prvním roštu.....	48
Obr. 40: Znázornění tlakové ztráty v grafu (rošt 1, médium 1).....	49
Obr. 41: Tlakové ztráty na druhém roštu.....	50
Obr. 42: Znázornění tlakové ztráty v grafu (rošt 2, médium 1).....	51

Obr. 43: Tlakové ztráty na třetím roštu (médium 1)	51
Obr. 44: Znárodnění tlakové ztráty v grafu (rošt 3, médium 1).....	52
Obr. 45: Tlakové ztráty na prvním roštu (rošt 1, médium 2).....	53
Obr. 46: Znárodnění tlakové ztráty v grafu (rošt 1, médium 2).....	54
Obr. 47: Tlakové ztráty na druhém roštu (rošt 2, médium 2)	55
Obr. 48: Znárodnění tlakové ztráty v grafu (rošt 2, médium 2).....	56
Obr. 49: Tlakové ztráty na třetím roštu (médium 2)	56
Obr. 50: Znárodnění tlakové ztráty v grafu (rošt 3, médium 2).....	57

13. Seznam tabulek

Tab. 1: Hodnoty konstanty K	24
Tab. 2: Vstupní parametry médií	27
Tab. 3: Charakteristické vlastnosti prvního roštu	28
Tab. 4: Vstupní rychlosti na roštu 1	28
Tab. 5: Charakteristické vlastnosti druhého roštu	29
Tab. 6: Vstupní rychlosti na roštu 2	29
Tab. 7: Charakteristické vlastnosti třetího roštu	30
Tab. 8: Vstupní rychlosti na roštu 3	30
Tab. 9: Charakteristické vlastnosti výstupního vedení	31
Tab. 10: Výstupní rychlosti na roštu	31
Tab. 11: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (1. rošt, médium 1).....	48
Tab. 12: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (2. rošt, médium 1).....	50
Tab. 13: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (3. rošt, médium 1).....	52
Tab. 14: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (1. rošt, médium 2).....	53
Tab. 15: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (rošt 2, médium 2).....	55
Tab. 16: Tlaková ztráta v jednotlivých bodech (3. rošt, médium 2).....	57
Tab. 17: Tlakové poměry na jednotlivých roštích.....	59
Tab. 18: Ceník jednotlivých dílů – pro první roštu (materiálové náklady)	61
Tab. 19: Celková cena prvního roštu (materiálové náklady).....	61
Tab. 20: Ceník jednotlivých dílů – pro druhý rošt (materiálové náklady)	62
Tab. 21: Celková cena druhého roštu (materiálové náklady).....	62
Tab. 22: Ceník jednotlivých dílů – pro třetí rošt (materiálové náklady)	63
Tab. 23: Celková cena třetího roštu (materiálové náklady).....	63
Tab. 24: Náklady na svařování prvního roštu (1 ks)	65
Tab. 25: Náklady na svařování druhého roštu (1 ks)	67
Tab. 26: Náklady na svařování třetího roštu (1 ks)	68
Tab. 27: Celkové náklady na výrobu jednoho roštu	69
Tab. 28: Technicko-ekonomické zhodnocení	69

14. Přílohy

- [1] Výkresová dokumentace druhý rošt – Plech 2, číslo výkresu: A3-2010-01/02
- [2] Výkresová dokumentace druhý rošt – ohýbaný díl, číslo výkresu: A4-2010-01/01
- [3] Výkresová dokumentace druhý rošt – sestava, číslo výkresu: A1-2010-01/00
- [4] Výkresová dokumentace třetí rošt – Plech 3, číslo výkresu: A3-2010-02/02
- [5] Výkresová dokumentace třetí rošt – ohýbaný díl, číslo výkresu: A4-2010-02/01
- [6] Výkresová dokumentace třetí rošt – sestava, číslo výkresu: A1-2010-02/00
- [7] Elektronická verze diplomové práce (CD)

Přiložený disk obsahuje:

/DP-text/diplomova-prace.pdf – elektronická verze diplomové práce – formát PDF

/vykresy/plech_2.pdf – výkres druhého roštu

/vykresy/segment_2.pdf – výkres ohýbaného prvku (rošt 2)

/vykresy/sestava_rost_2.pdf – výkres sestavení druhého roštu

/vykresy/plech_3.pdf – výkres třetího roštu

/vykresy/segment_3.pdf – výkres ohýbaného prvku (rošt 3)

/vykresy/sestava_rost_3.pdf – výkres sestavení třetího roštu